



Universidad
Carlos III de Madrid

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

PROYECTO FIN DE CARRERA

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE UNA MEZCLADORA DE FLUIDOS

Autor: Moreno Alonso, Francisco José

Directores: Armingol Moreno, José María

Sánchez Yuste, Alberto.

Título: Diseño del sistema de control de una mezcladora de fluidos

Autor: Moreno Alonso, Francisco José

Directores: Armingol Moreno, José María

Sánchez Yuste, Alberto.

EL TRIBUNAL

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 7 de Julio de 2014 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

Este proyecto no podría haber sido posible de no ser la gente que ha estado conmigo durante este tiempo y me ha apoyado en todo momento. Los años pasados en la universidad han significado mucho para mí, han sido años de preparación, estudio, aprendizaje, pero también de historias, momentos y amigos. La universidad ha sido el camino que he seguido para alcanzar el punto en el que me encuentro ahora, el punto de partida hacia el futuro como ingeniero que quiero conseguir.

En primer lugar me gustaría agradecer a mi familia, que siempre han estado ahí, apoyándome en todas las decisiones y momentos, tanto buenos y malos, y me han empujado a seguir hacia adelante. Ellos son los que me han ofrecido todo lo que tenían disponible, y a veces lo que no tenían, para que yo haya podido llegar a donde estoy ahora.

A mis grandes amigos, David González y Jorge López, con los que siempre he podido contar, y que han permanecido a mi lado, aun cuando las situaciones han llegado a los extremos. A ellos agradecerles el permanecer a mi lado y soportarme en todo momento.

Durante la estancia en la universidad, he conocido gran cantidad de personas, muchos grandes compañeros, algunos de los cuales se han convertido en amigos. Gracias a todos, y en especial a Ángel Luis Martín, Antonio Merillas y Jorge Martín.

Por último agradecerle a mis tutores, a Alberto Sánchez, mi tutor en la empresa, por darme la oportunidad de realizar este proyecto con ellos, y a Jose María Armingol, por aceptar ser mi tutor académico y ayudarme en el desarrollo final de este proyecto.

Francisco José Moreno Alonso

18 de junio de 2014

Índice general

Agradecimientos	iv
Índice general.....	v
Índice de figuras	vii
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estructura	3
2. Estado del arte.	5
2.1. Control de procesos.....	5
2.1.1. Definición	5
2.1.2. Historia	5
2.1.3. Explicación.....	8
2.1.3.1. Acciones básicas de control	11
2.1.3.1.1. Acción de control proporcional.....	12
2.1.3.1.2 Acción de control integral.	12
2.1.3.1.3 Acción de control derivativo.	13
2.1.3.1.4. Acción de control proporcional-integral.	14
2.1.3.1.5. Acción de control proporcional-derivativa.	14
2.1.3.2. Reguladores PID	15
2.3. Matlab	16
3. Sistema real.....	18
3.1 Descripción del proceso	18
3.2. Componentes principales.	21
3.2.1. Bombas.....	21
3.2.2. Caudalímetro	22
3.2.3. Másicos.....	23

3.2.4. Válvulas	24
4. Diseño	26
4.1. Creación del sistema.....	26
4.2. Diseño de los PID.....	30
5. Resultado y discusión	50
6. Presupuesto	51
7. Conclusiones	53
8. Bibliografía	54

Índice de figuras

Figura 1. Reloj de agua de Ktesibios.....	6
Figura 2. Regulador cónico de Watt.....	7
Figura 3. Sistema de control en lazo cerrado.....	9
Figura 4. Bloque de control proporcional.	12
Figura 5. Bloque de control integral.....	13
Figura 6. Bloque de control derivativo.....	13
Figura 7. Bloque de función Proporcional-Integral.	14
Figura 8. Bloque de función Proporcional-Derivativa	15
Figura 9. Bloque de función Proporcional-Integral-Derivativa.	16
Figura 10. Ventana principal de Matlab.....	17
Figura 11. Sistema mezclador de fluidos.....	18
Figura 12. Panel de control del mezclador. Esquema del sistema.....	20
Figura 13. Bomba centrífuga instalada en el mezclador.....	22
Figura 14. Caudalímetro Endress+Hauser para el flujo de agua.	23
Figura 15. Másicos para Jarabe y carbónico.	23
Figura 16. Válvula Moog, serie 79.....	24
Figura 17. Válvula Moog, serie 79, corte transversal.....	24
Figura 18. Válvula Norgren, para carbónico.....	25
Figura 19. Diagrama BODE con respuesta dinámica, válvula de agua.	28
Figura 20. Diagrama BODE con respuesta dinámica, válvula de jarabe.....	29
Figura 21. Polos de la función de transferencia VA.	29
Figura 22. Polos de la función de transferencia VJ.....	30
Figura 23. Respuesta teórica a obtener con los métodos de Ziegler-Nichols. Sobrepaso máximo de un 25%.....	30
Figura 24. Respuesta teórica a entrada a escalón de un sistema, para cálculo de Ziegler-Nichols.	31
Figura 25. Reglas de sintonización de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta.	31
Figura 26. Código para calcular las variables principales de Ziegler-Nichols.....	32
Figura 27. Polos de la válvula de agua.	33
Figura 28. Respuesta a escalón de la válvula de agua.....	34
Figura 29. Cálculo de variables iniciales de Z-N.	34

Figura 30. Respuesta del sistema en lazo cerrado con el PID inicial.....	35
Figura 31. Función en lazo cerrado para la primera aproximación de Ziegler-Nichols.....	36
Figura 32. Calculo de nuevo controlador PID a partir del calculado por Ziegler-Nichols.	36
Figura 33. Respuesta a PID con $K_{pe}=5*K_p$	37
Figura 34. Respuesta a PID con $K_{pe}=10*K_p$	37
Figura 35. Respuesta a PID con $K_{pe}=0.5*K_p$	38
Figura 36. Respuesta PID con $K_{ie}=10*K_i$	38
Figura 37. Respuesta PID con $K_{ie}=0.5*K_i$	39
Figura 38. Respuesta PID con $K_{de}=2*K_d$	40
Figura 39. Respuesta PID con $K_{de}=10*K_d$	40
Figura 40. Respuesta PID con $K_{de}=0.5*K_d$	41
Figura 41. Primera aproximación a nuestro PID. $K_{pe}=1.2*K_p$ y $K_{de}=1.5*K_d$	41
Figura 42. Respuesta del sistema a nuestro PID.	42
Figura 43. Detalle de los picos del sistema con el nuevo control PID.	42
Figura 44. Segunda aproximación a nuestro PID. $K_{pe}=2*K_p$ y $K_{de}=2*K_d$	43
Figura 45. Respuesta del sistema a nuestro segundo PID.....	43
Figura 46. Código para calcular las variables principales de Ziegler-Nichols para la válvula de jarabe.	44
Figura 47. Polos de la válvula de jarabe.	45
Figura 48. Respuesta a escalón de la válvula de jarabe.	45
Figura 49. Respuesta del sistema en lazo cerrado con el PID inicial.....	47
Figura 50. Respuesta del sistema para el primer PID modificado.	47
Figura 51. Respuesta del sistema de la válvula de jarabe a nuestro segundo PID.	48
Figura 52. Coste de personal.....	51
Figura 53. Coste de material.	52
Figura 54. Coste total del proyecto.....	52

1. Introducción

1.1. Motivación

Hoy en día todo es automático o tiene una gran parte de automática, desde el aire acondicionado de casa hasta las grandes fundiciones. Por ejemplo, con tan solo con elegir una temperatura objetivo, tenemos la habitación aclimatada a nuestro gusto. Los vehículos se mantienen a velocidades constantes sin interactuar con ellos, realizando el cambio de marchas de manera autónoma según necesidades, y todo esto es posible gracias a los reguladores y la teoría de control.

Los reguladores son tan variados como las necesidades del usuario. No es necesaria la misma velocidad de respuesta en un sistema de aire acondicionado de una habitación, como se necesita en el sistema de bloqueo de frenos del ABS del coche. Cuando estamos en una habitación, no es crítico que la temperatura llegue al punto deseado de manera rápida y precisa, pero en cambio, esta rapidez y precisión si es una necesidad en el ABS. No podemos permitirnos un mínimo error cuando se trata de un tema de seguridad, pues podría significar la diferencia entre un accidente o una simple advertencia.

Mi interés por los reguladores se debe a su gran variedad de tipos y usos, y a la gran importancia que toman en el mundo. Los reguladores no son algo de hoy en día. Desde tiempos pasados se han utilizado diferentes formas de regulación, para intentar tener control sobre las cosas. Siempre han estado presentes en la vida de las personas de una forma directa o indirecta, teniendo conocimiento de ellos o no.

Pero fue durante la revolución industrial cuando realmente se produjo el desarrollo de los mismos. Desde ese entonces hasta los tiempos modernos, los reguladores han pasado de controlar la velocidad de una locomotora, a controlar cada uno de los aspectos que entrañan el manejo de uno de estos vehículos en nuestros días.

Y una gran pieza en el desarrollo de los reguladores de nuestros días fue el regulador PID. Este regulador es la base de muchos de los sistemas de control y producción de hoy en día, por su simplicidad, robustez, fiabilidad y tolerancia a fallos.

Por estas razones he decidido desarrollar un proyecto sobre los PID, para ampliar mis conocimientos sobre lo que se considera la base para el control moderno de hoy en día. Considero que cuando un sistema se mantiene en uso después de tanto tiempo, aun cuando en nuestros días se desarrollan controladores con base en lógica difusa y se trabaja con inteligencia artificial, es algo a tener en cuenta.

1.2. Objetivos

El presente trabajo final de grado está enmarcado dentro de unas prácticas en empresa realizadas en una fabrica embotelladora de bebidas gaseosas. Esta fábrica en concreto, dispone de 11 líneas de producción simultánea, en diferentes tipos de envases. Para el proceso de producción, la máquina principal y básica del proceso, es aquella en la que se realiza la mezcla de compuestos para conseguir la bebida objetivo.

Esta máquina dispone de un control automático propio, ya desarrollado y en funcionamiento. En la fábrica, todo lo relacionado a este mezclador, estaba bastante borroso en cuanto a conocimiento técnico se refiere. Para mejorar y ampliar el conocimiento del que se dispone sobre el mismo, se propuso realizar un análisis y estudio del sistema, y así desmitificar una máquina compleja que se tiende a controlar con limitaciones.

En este ámbito, se me ofreció la oportunidad de analizar un sistema real, con todo lo que ello atañe, y estudiar más a fondo la teoría de control aprendida durante mis estudios, y desarrollar mi trabajo final de grado en empresa durante las prácticas en empresa.

Como consecuencia de lo anterior, se definió como objetivo global diseñar un controlador PID para esta máquina mezcladora de fluidos en un sistema de producción real en funcionamiento continuo. Para realizar esto, es necesario un análisis previo del funcionamiento general de la máquina, para ir avanzando hacia una visión más específica de componentes y utilidades.

Con toda la información obtenida en el análisis del sistema y consulta de manuales disponibles en la fábrica, se procederá a desarrollar un sistema teórico que responda de manera similar al mezclador. Esto es así, debido a que al ser un sistema que está dentro de una línea de producción continua, no se puede detener para realizar las pruebas con los cambios necesarios para el estudio. También debido a esto, y dado que en la mezcla hay incluidos elementos reales, que tienen un coste asociado, no es posible probar diferentes sistemas, que conlleven a un desperdicio de estos elementos.

Por todo esto, se desarrollará un controlador PID de manera teórica sobre el sistema real en funcionamiento, aplicando el modelo teórico obtenido, de manera que se ajuste a los márgenes de la producción establecidos, respetando los valores reales.

El modelo teórico lo obtendremos del análisis de nuestro sistema. Tras este análisis, y con las características propias obtenidas, crearemos un sistema o función de transferencia con la que trabajar, que utilizaremos para el desarrollo del PID y el estudio del sistema.

Los pasos principales a seguir durante el desarrollo de este proyecto se definen en los siguientes puntos:

- Analizar el sistema a controlar.
- Determinar los elementos donde se va a desarrollar el control y las diferentes relaciones que los conectan.
- Determinación del modelo teórico que represente los elementos a controlar.

- Utilizar las reglas de sintonización para desarrollar un controlador PID que esté dentro de los márgenes de producción.
- Estudio y análisis de la respuesta.

Para llevar a cabo este proyecto se utilizará el programa Matlab, y las diferentes herramientas que lo componen, que permiten estudiar los sistemas de control en profundidad, realizando los cálculos necesarios de manera precisa, apoyando el desarrollo con gráficos para mejorar la parte visual del proyecto.

1.3. Estructura

Este documento está dividido en ocho capítulos durante los cuales se desarrolla este trabajo final de grado. Cada uno de los capítulos intenta ayudar a la comprensión total del trabajo, aportando el conocimiento referente al estado del arte, a las características del sistema, o a los pasos seguidos para la consecución de los objetivos planteados. En estos capítulos se explican las decisiones tomadas en el desarrollo del proyecto y las consecuencias de las mismas, los resultados obtenidos y las conclusiones asociadas a estos.

Durante el capítulo uno se realiza una introducción a lo que será el trabajo en general, empezando con una descripción de las motivaciones que han impulsado el desarrollo del mismo y que han dado lugar a su finalización. Es también en este capítulo donde se enmarcan y presentan los objetivos fijados para este proyecto, sirviendo como guía en el desarrollo del trabajo. El último punto dentro de este capítulo es la estructuración, donde se detallan las partes en las que se divide y de que componen el proyecto.

Posteriormente, se ofrece información teórica sobre el estado del arte, para que el lector pueda enmarcar correctamente el trabajo. Esto se desarrolla durante el capítulo dos, cuyo inicio se centra en ofrecer una definición de la rama que engloba este proyecto, así como una introducción del desarrollo histórico que ha tenido lugar durante los siglos que lleva ayudando y apoyando a la humanidad. En este capítulo encontramos también una explicación sobre los sistemas de control, incluyendo las definiciones de sus componentes así como las diferentes acciones de control básicas que podemos encontrar.

Es en este capítulo donde hacemos una pequeña introducción a Matlab, arañando la superficie, para dar un vistazo rápido de la herramienta a utilizar. Siendo Matlab una herramienta tan completa y compleja, se podría desarrollar un trabajo aparte dando explicación a todas sus características.

En el capítulo tres se realiza una descripción del proceso productivo del mezclador, detallando cada uno de los pasos que lo componen y que vamos a considerar dentro de nuestro sistema a controlar, así como de los componentes principales que lo forman y que influyen o pueden influir en el desarrollo del control. De estos componentes se aporta la información principal y más esencial, ya que toda la información específica y detallada se puede encontrar en los correspondientes datasheet que se indican en la bibliografía (capítulo ocho).

Es en el capítulo cuatro donde se entra a trabajar directamente con el sistema. Durante este capítulo se explican las consideraciones tomadas para definir el sistema a controlar, las acciones y decisiones tomadas durante este desarrollo, y la solución final, con la función de transferencia del sistema.

Después de conseguir la función de transferencia con la que trabajar, empezamos el desarrollo y diseño del PID en función de estos sistemas. Se detallan los pasos seguidos para la consecución de los objetivos, mostrando los límites aceptables y los conseguidos, y varias posibles opciones.

Después de los resultados obtenidos en el capítulo anterior, es en el capítulo cinco donde se muestran los resultados finales y los comentarios asociados a los mismos. En este capítulo se detalla la vista general que podemos obtener de estos resultados, y el porqué de los mismos.

Posteriormente, se realiza una valoración económica de todas las actividades desarrolladas en este trabajo, que se detallan en el presupuesto del capítulo seis. En este presupuesto se exponen los costes materiales asociados a lograr acabar este trabajo final de grado, así como los costes de personal.

En el capítulo siete se realiza un análisis de los objetivos cumplidos, y se exponen las conclusiones alcanzadas tras la realización del proyecto.

La bibliografía mostrada en el capítulo ocho contiene una relación de los documentos consultados durante la elaboración del trabajo. En esta figuran tanto documentación técnica de la que se ha obtenido los datos para la realización del proyecto, como los libros y documentos de consulta teórica que han servido de base para el desarrollo del proyecto. Mucha de la bibliografía consultada, pertenece a la biblioteca interna de la fábrica, compuesta por las hojas de características y manuales de operación de las máquinas, y no pueden mostrarse por motivos de protección de datos y las normas de seguridad de la empresa.

2. Estado del arte.

2.1. Control de procesos

2.1.1. Definición

El control de procesos se engloba dentro del mundo de la automática. Según el Diccionario de la lengua española [1], automática es: “Ciencia que trata de sustituir en un proceso el operador humano por dispositivos mecánicos o electrónicos.” Esto implica la idea de la automatización de las tareas realizadas por el hombre, para facilitar estas y mejorar su eficiencia.

La automática nos da tanto las técnicas como los procedimientos de análisis y diseño sobre los sistemas evolutivos con el tiempo. Esto se ha transformado en una optimización de los procesos, haciendo de la automática una herramienta vital en el avance de la ingeniería y la ciencia de nuestros días.

Además de su extrema importancia en los sistemas de vehículos espaciales, de guiado de misiles, robots y similares [2]; la automática se ha vuelto una parte importante e integral de los procesos modernos, tanto industriales como de manufactura, sin olvidar su aporte a sectores como la sanidad, servicios, así como en casi todas las facetas de la vida cotidiana.

Un sistema automático de control es un conjunto de componentes físicos conectados o relacionados entre sí, de manera que regulen o dirijan su actuación por sí mismos, es decir, sin intervención de agentes exteriores, corrigiendo además los posibles errores que se puedan presentar en su funcionamiento

2.1.2. Historia

Desde los orígenes de la humanidad, el hombre ha buscado caminos para facilitar la vida, sustituyéndole en las situaciones más trabajosas y complicadas. Uno de los primeros hechos que demuestran esto son los sistemas de regadíos en Babilonia, sobre el año 2000 A.C. y que se han conocido a través de las leyes grabadas en el código de Hamurabi.

Ya los griegos diseñaron un sistema realimentado, utilizando reguladores de flotación. Un ejemplo de esto es la Clepsidra, o reloj de agua, que mide el tiempo sobre la base de lo que tarda una cantidad de agua en pasar de un recipiente a otro, como el reloj de Ktesibios (**figura 1**). Otro ejemplo de aquella época es la lámpara de aceite de Philon, que regulaba el nivel de aceite en una lámpara. Al quemarse el aceite de lámpara, el nivel del depósito de aceite bajaba haciendo que entrara aire en otro depósito de forma que éste suministraba más aceite al depósito de la lámpara.

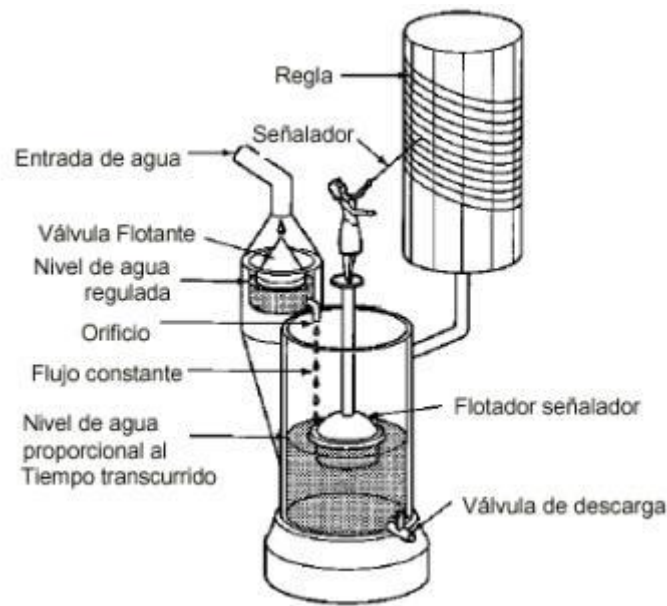


Figura 1. Reloj de agua de Ktesibios

El primer regulador conocido en la Europa Moderna, es el regulador de temperatura de Cornelius Drebbel, desarrollado para calentar una incubadora. Su funcionamiento se basaba en la apertura de una válvula, regulada a través del nivel de un termómetro instalado en el interior, que permitía que el flujo de aire caliente saliese de la incubadora, para mantener la temperatura a un nivel constante.

Pero cuando realmente se llevó a cabo el desarrollo de la automática y los sistemas de control, fue durante la revolución industrial, cuando James Watt [2] desarrolla el control automático de velocidad para la máquina de vapor. Basándose en los péndulos cónicos utilizados para el control de las piedras de molino, Watt desarrolla un sistema de control proporcional para regular la velocidad de movimiento de las máquinas de vapor, el regulador centrífugo o de bola flotante (**Figura 2**). Las esferas giran en función de la velocidad, accionando así la válvula de entrada de vapor, variando la presión dentro del depósito, y de manera directamente proporcional, la velocidad de la locomotora.

Posteriormente, otros inventores introdujeron mecanismos para integrar el error de la velocidad y así proporcionaron una reposición automática. Uno de estos inventores fue Siemens, que dotó al regulador de Watts de acción integral, introduciendo la acción de control flotante, sin referencia fija. Estos reguladores no se centraban en la parte teórica del análisis del regulador, tan solo en la parte física y práctica.

Fue G.B. Airy el que se interesó por el control de la velocidad, para mejorar sus telescopios. Airy fue el primero en presentar la inestabilidad en un sistema de control, analizando un sistema a través de ecuaciones diferenciales, y por tanto, asentando los comienzos del estudio de la dinámica de control de sistemas retroalimentados. Dada la complejidad del trabajo de Airy, este permaneció en el más absoluto de los secretos hasta que J.C. Maxwell resolvió el sistema, iniciando la teoría de los sistemas de control automático.

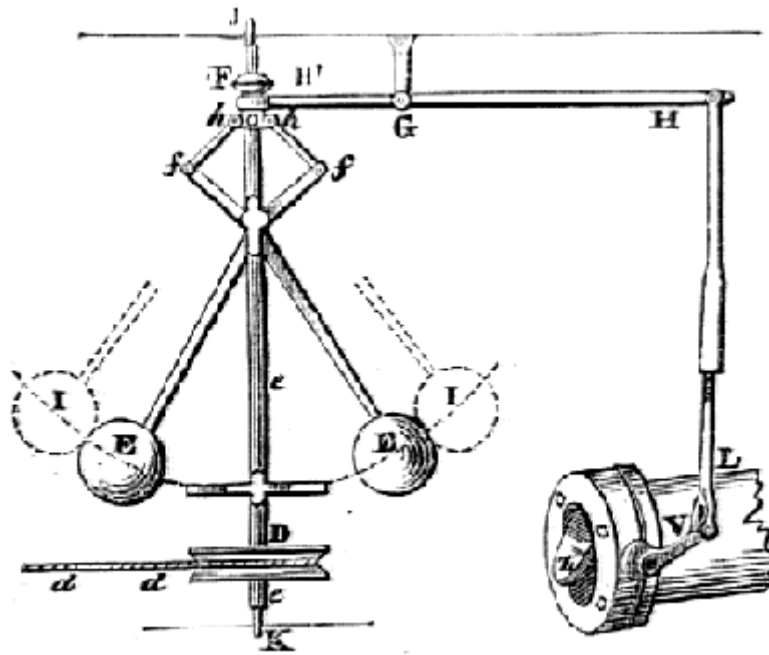


Figura 2. Regulador cónico de Watt.

La contribución de Maxwell fue reconocer que “la conducta de un sistema de control automático en la velocidad de una posición de equilibrio se podría aproximar por una ecuación diferencial lineal, y por tanto su estabilidad se podía discutir en términos de las raíces de una ecuación algebraica asociada”. De esta manera, Maxwell llegó a especificar que un sistema era inestable cuando la parte real de sus raíces complejas fuesen positivas, pero el problema era cómo determinar la localización de estas raíces y partes reales sin calcular las soluciones a las ecuaciones de sistemas de orden elevado.

La solución a este problema la introdujo E.J. Routh en su ensayo en 1877. Routh abordó de forma matemática la estabilidad de sistemas de alto orden basándose en los trabajos de Cauchy. Este ensayo tuvo tanto interés para los ingenieros de control, que aún hoy en día siguen aprendiendo esta técnica. Después de la publicación del trabajo de Routh, el ruso Lyapunov, estudió la estabilidad del movimiento, y en 1892 utilizó las ecuaciones no lineales de movimiento e incluyó resultados equivalentes al criterio de Routh. Su trabajo no se introdujo en la literatura de control hasta 1958.

Con la llegada de los amplificadores electrónicos y las llamadas a larga distancia, se llegaron a desarrollar serios problemas en cuanto a pérdida de señal y distorsiones debidas a las pequeñas no linealidades de los tubos de vacío. Como solución a este problema, Harold S. Black, en 1934, inventó el amplificador retroalimentado, que aplicaba el principio de que para reducir la distorsión, había que aumentar la retroalimentación.

Con el paso de los años, y dado que la utilización de las técnicas clásicas de análisis de la ecuaciones diferenciales era impensable, debido a que los dispositivos podían contener más de 50 elementos almacenadores de energía independientes, Harry Nyquist propuso una solución a este problema, basándose en la forma de la respuesta en frecuencia de la ganancia en lazo abierta. A partir de esta teoría, se desarrolló una extensa metodología de diseño de

amplificadores retroalimentados, descrita en el libro de Hendrik Bode, introduciendo los términos de margen de fase y margen de ganancia.

Hasta principios del siglo 20, los controladores todo-nada habían sido los más utilizados en procesos industriales. Para resolver y mejorar los problemas de regulación de las máquinas, Nicholas Minorsky presenta un análisis claro de los sistemas de control de posición, formulando la ley de control que hoy conocemos como control PID. Una contribución de gran importancia fue la de Ziegler y Nichols, que propusieron unas fórmulas empíricas para asignar los coeficientes de las distintas acciones basándose en valores del proceso a controlar y que son medidos experimentalmente.

Fue Evans, en 1948, el que completó el desarrollo de las técnicas que hoy se conocen globalmente como la Teoría Clásica de Control. Evans completó el desarrollo de las técnicas basadas en variable compleja al introducir el lugar de las raíces. Este método permite hacer deducciones sobre las raíces de la ecuación característica en lazo cerrado cuando se varía un parámetro de la planta, y por lo tanto, estudiar así su estabilidad.

2.1.3. Explicación

Para poder analizar los sistemas de control, debemos definir una serie de términos básicos que componen todo sistema de control. El libro de Ogata [2], "Ingeniería de Control Moderna" da las siguientes definiciones:

- Variable controlada y variable manipulada: La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla. La variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. Por lo común, la variable controlada es la salida (el resultado) del sistema. Controlar significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar una desviación del valor medido a partir de un valor deseado. En el estudio de la ingeniería de control, necesitamos definir términos adicionales que resultan necesarios para describir los sistemas de control.

- Plantas: Una planta puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de las partes de una máquina que funcionan juntas, el propósito de la cual es ejecutar una operación particular.

- Procesos: El Diccionario Merriam-Webster define un proceso como una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden uno al otro en una forma relativamente fija y que conducen a un resultado o propósito determinados; o una operación artificial o voluntaria progresiva que consiste en una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o propósito determinados.

- Sistemas: Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. El concepto de sistema se aplica a fenómenos abstractos y dinámicos.

- Perturbaciones: Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema, se denomina interna, en tanto que una perturbación externa se produce fuera del sistema, y es una entrada.

- Control realimentado: El control realimentado se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia, y lo continúa haciendo en base a esta diferencia. Aquí sólo se especifican con este término las perturbaciones impredecibles, dado que las perturbaciones predecibles o conocidas siempre pueden compensarse dentro del sistema.

En este proyecto vamos a basarnos en el estudio y aplicación de los sistemas de control realimentados, entendiendo como un sistema de control realimentado el sistema que mantiene una relación entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia entre ambas como el medio de control.

En el mundo de los sistemas de control hay dos tipos básicos de construcción de los mismos, que se diferencian en la forma en la que controlamos la salida:

- Sistemas de control en lazo abierto: son aquellos sistemas en los que la acción de control es independiente de la salida del sistema, esto es, la salida no se mide de ninguna manera ni se realimenta para compararla con la entrada. Por tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija, debido a lo cual, la precisión del sistema depende de la calibración. Con este tipo de sistema no se consiguen resultados deseados en ambientes con perturbaciones, por lo que su uso está limitado a situaciones muy concretas.

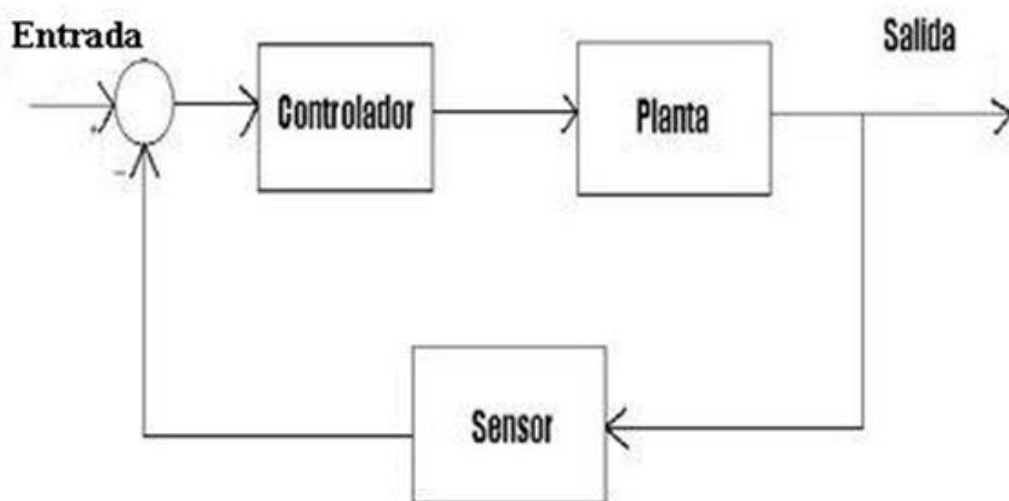


Figura 3. Sistema de control en lazo cerrado.

- Sistemas de control en lazo cerrado: son aquellos en los que la acción de control depende de la salida del sistema. Esto se consigue alimentando al controlador con la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación, con el objetivo de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. Estos sistemas se usan cuando se presentan perturbaciones y/o variaciones impredecibles. En la **figura 3** se muestra un sistema de control en lazo cerrado.

La ventaja clara que presenta el sistema de control en lazo cerrado frente al de lazo abierto es que la respuesta del sistema es relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema, debido a la realimentación. Por tanto, se pueden realizar operaciones precisas en ambientes con perturbaciones, con elementos relativamente baratos. En contrapartida, desde el punto de vista de la estabilidad, el sistema de control en lazo abierto es más fácil de desarrollar, ya que la estabilidad del sistema no es un problema importante.

Los sistemas de control actuales, son en su mayoría no lineales. Sin embargo, mediante diferentes métodos o modelos matemáticos lineales, es posible aproximarlos. Son las propias características de los sistemas las que nos dan la información necesaria para elegir qué método utilizar.

Los métodos de respuesta en frecuencia y del lugar geométrico de las raíces, que forman el núcleo de la teoría de control clásica, conducen a sistemas estables que satisfacen un conjunto más o menos arbitrario de requerimientos de desempeño. En general, estos sistemas son aceptables pero no óptimos en forma significativa. Desde el final de la década de los cincuenta, el énfasis en los problemas de diseño de control se ha movido del diseño de uno de muchos sistemas que trabajen apropiadamente, al diseño de un solo sistema óptimo de algún modo significativo.

En el proceso de llegar a estos sistemas óptimos se han desarrollado diferentes métodos de análisis, para conseguir las calibraciones de las plantas o procesos.

Nos referimos a la respuesta de un sistema en estado estable a una entrada senoidal con el término respuesta en frecuencia. En los métodos de la respuesta en frecuencia, la frecuencia de la señal de entrada se varía en un cierto rango, para estudiar la respuesta resultante.

Este método, basado en los sistemas con una entrada y una salida, pierde solidez frente a las plantas modernas con muchas entradas y salidas que se vuelven cada día más complejas, lo que obliga a la utilización de muchas más ecuaciones.

Desde la aparición de las computadoras digitales, el análisis en el dominio del tiempo y la síntesis a partir de variables de estados, base de la teoría de control moderna, se ha desarrollado para enfrentarse a esta creciente complejidad de las plantas y los requerimientos limitativos de los procesos. Este nuevo enfoque se basa en el concepto de estado. El concepto de estado por sí mismo no es nuevo, dado que ha existido durante largo tiempo en el campo de la dinámica clásica y en otros medios.

La principal diferencia que se tiene entre el control moderno y el clásico, es que el primero se aplica a sistemas con entradas y salidas múltiples, pudiendo ser lineales o no, en tanto que la segunda solo se aplica a sistemas lineales con una entrada y una salida e invariantes en el tiempo.

Para la realización de este proyecto se tomará como referencia la teoría de control moderna [2], dada la estructura objetivo, un sistema con tres entradas y una salida, para lo cual, se definen los siguientes términos.

- Estado. En un sistema dinámico, se denomina estado al conjunto más pequeño de variables de modo que el conocimiento de estas variables en $t=t_0$, junto con el conocimiento de la entrada para $t \geq t_0$, determina por completo el comportamiento del sistema para cualquier tiempo $t \geq t_0$. Este concepto no está limitado a los sistemas físicos, se puede aplicar a sistemas biológicos, económicos y otros.

- Variables de estado. Las variables de estado de un sistema dinámico son aquellas que forman el conjunto más pequeño que determinan el estado del mismo. Las variables de estado no necesitan ser cantidades medibles u observables físicamente, aunque en la práctica es conveniente elegir cantidades que se midan con facilidad, para su posterior realimentación con una ponderación conveniente.

- Vector de estado. Un vector de estado es aquel que determina de manera única el estado del sistema $x(t)$ para cualquier tiempo $t \geq t_0$, una vez que se obtiene el estado en $t=t_0$ y se especifica la entrada $u(t)$ para $t \geq t_0$. Esto es, si se necesitan n variables de estado para describir por completo un sistema, estas n variables de estado se considerarán las n componentes de un vector $x(t)$.

- Espacio de estados. El espacio de n dimensiones cuyos ejes de coordenadas están formados por el eje x_1, x_2, \dots, x_n , se denomina espacio de estados. Cualquier estado puede representarse mediante un punto en el espacio de estados.

2.1.3.1. Acciones básicas de control

Durante el punto anterior, hemos explicado los diferentes modos básicos de control directo de los sistemas. Un controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia, determina la desviación, y produce una señal de control que reducirá la desviación a cero o a un valor pequeño. La manera en la cual el controlador automático produce la señal de control se denomina acción de control.

En este proyecto, vamos a diseñar un controlador PID, para lo cual, empezaremos con el análisis de cada uno de sus componentes por separado, para luego pasar al conjunto del mismo. El controlador PID es la combinación de una acción de control proporcional, una acción de control integral y una acción de control derivativa, aportando las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales al conjunto.

A continuación pasamos a describir cada una de estas acciones por separado, y como se relacionan entre sí, según podemos encontrar en el libro de Ogata [2].

2.1.3.1.1. Acción de control proporcional.

Para un controlador con acción de control proporcional, la relación entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ es:

$$u(t) = K_p e(t)$$

O bien, en cantidades transformadas por el método de Laplace:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

En ambas formas, K_p se considera la ganancia proporcional del sistema.

En esencia, para cualquier sistema o mecanismo real y la forma de la potencia de operación, el controlador proporcional es un amplificador con una ganancia ajustable, tal y como se ve en la **figura 4**.

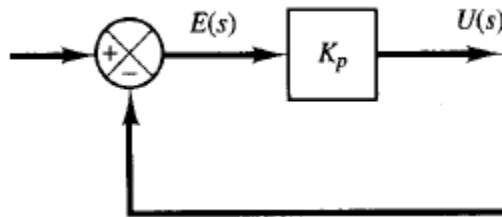


Figura 4. Bloque de control proporcional.

2.1.3.1.2 Acción de control integral.

En los controladores con acción de control integral, el valor de la salida del controlador $u(t)$ se cambia a una razón proporcional a la señal de error $e(t)$.

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t)$$

O bien:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt$$

Donde K_i es una constante ajustable. La función de transferencia del controlador integral, por el método de Laplace es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$$

A veces, a la acción de control integral se le denomina control de reajuste. Esto es así porque si por algún casual, el valor de $e(t)$ se duplicase, $u(t)$ variaría dos veces más rápido. En la **figura 5**, se muestra un diagrama de bloques de este controlador.

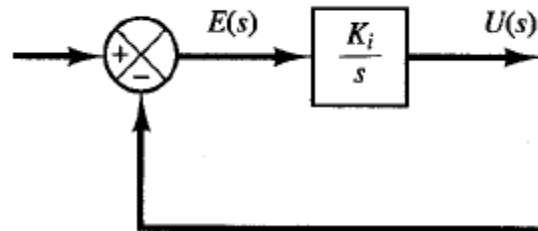


Figura 5. Bloque de control integral.

2.1.3.1.3 Acción de control derivativo.

En los controladores con acción de control derivativo, la relación entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ es:

$$u(t) = T_d \times \frac{de(t)}{dt}$$

O bien, a través de su transformada de Laplace:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = T_d s$$

Es la acción de control en la cual el valor de la salida es proporcional a la velocidad de variación de la señal de error actuante. La acción derivada es adecuada cuando hay retraso entre el movimiento de la válvula de control y su repercusión a la variable controlada (**Figura 6**).

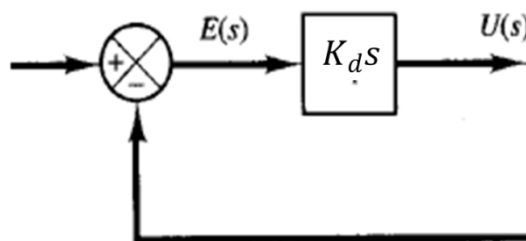


Figura 6. Bloque de control derivativo.

2.1.3.1.4. Acción de control proporcional-integral.

La acción de control de un controlador proporcional-integral (PI) se define mediante la suma de sus componentes, tal y como vemos a continuación:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

O la función de transferencia del controlador es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

En donde K_p es la ganancia proporcional y T_i se denomina tiempo integral. Tanto K_p como T_i son ajustables. El tiempo integral ajusta la acción de control integral, mientras que K_p afecta a las partes integral y proporcional de la acción de control. A la inversa a T_i se le denomina velocidad de reajuste. La velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. En la **figura 7** vemos el esquema de este controlador.

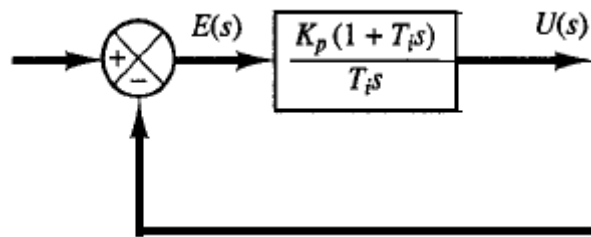


Figura 7. Bloque de función Proporcional-Integral.

2.1.3.1.5. Acción de control proporcional-derivativa.

La acción de control de un controlador proporcional-derivativa (PD) se define mediante la suma de las dos ganancias base:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Cuya función de transferencia aplicando Laplace es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s)$$

En donde K_p es la ganancia proporcional y T_d es una constante denominada tiempo derivativo, siendo ambas ajustables (**Figura 8**). El tiempo derivativo T_d es el intervalo de tiempo durante el cual la acción de la velocidad hace avanzar el efecto de la acción de control proporcional. Aunque la acción de control derivativa tiene un carácter de previsión, nunca

prevé una acción que nunca ha ocurrido. Aun teniendo la acción de control derivativa la ventaja de ser previsión, tiene las desventajas de que amplifica las señales de ruido y puede provocar un efecto de saturación en el actuador.

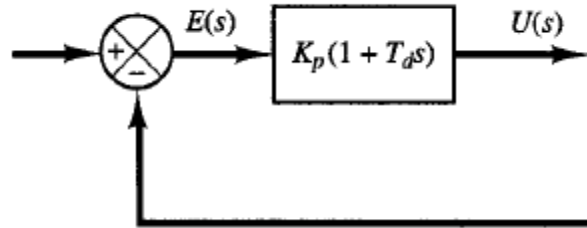


Figura 8. Bloque de función Proporcional-Derivativa

2.1.3.2. Reguladores PID

Hoy en día, más de la mitad de los controladores industriales que se usan, utilizan esquemas de control PID o PID modificado [2]. Los controladores PID analógicos son, principalmente, de tipo hidráulico, neumático, electrónico, eléctrico o combinaciones de ellos. Actualmente, muchos de éstos se transforman en formas digitales mediante el uso de microprocesadores.

Aunque la mayor parte de los controladores PID se ajustan en el sitio, existen diversos métodos automáticos de sintonización, incluyendo la capacidad de algunos PID de sintonizarse automáticamente en línea.

La utilidad de los controles PID estriba en que se aplican en forma casi general a la mayoría de los sistemas de control, aportando un control satisfactorio, aunque tal vez no aporten un control óptimo en muchas situaciones específicas.

Se denomina controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) a la combinación de las tres acciones de control básicas, proporcionales, integrales y derivativas. Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individualmente. La ecuación de un controlador con estas características se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

O mediante su transformada de Laplace:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

En donde K_p es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo. El diagrama de bloques del mismo, se ve en la **figura 9**.

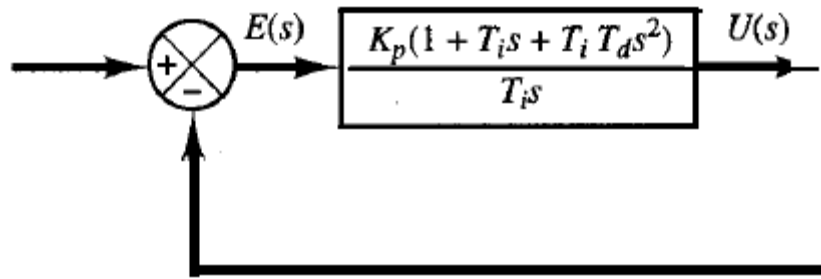


Figura 9. Bloque de función Proporcional-Integral-Derivativa.

Utilizando únicamente un controlador proporcional, al aumentar la ganancia, estaríamos creando transitorios oscilantes o directamente inestables, algo totalmente indeseado en la creación de un controlador.

Tomando como partida este planteamiento, introducimos el controlador integral, cuya función es eliminar el error en régimen estacionario. El factor integral dejaría de integrar cuando el sistema se estabilice, es decir, cuando el error sea nulo.

En cuanto al controlador derivativo, se utiliza para mejorar los transitorios del sistema y el comportamiento frente a perturbaciones, oponiéndose a cualquier cambio brusco en el error.

2.3. Matlab

Matlab es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación [3]. Mediante Matlab, es posible analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos o aplicaciones. El lenguaje, las herramientas y las funciones matemáticas incorporadas permiten explorar diversos enfoques y llegar a una solución antes que con hojas de cálculo o lenguajes de programación tradicionales, como pueden ser C/C++ o Java. Los usos típicos incluyen

- Matemática y cálculo.
- Desarrollo de algoritmos.
- Adquisición de datos.
- Modelado, simulación y creación de prototipos.
- Análisis de datos, exploración y visualización.
- Gráficos científicos y de ingeniería.
- Desarrollo de aplicaciones, incluyendo creación de interface gráfica para el usuario.

Matlab es un sistema interactivo cuyo elemento base es un array que no requiere dimensionamiento. Esto permite el solventar muchos problemas técnicos informáticos, especialmente aquellos con formulación de matrices y vectores, en una fracción de tiempo de lo que podría llegar a tardarse escribiendo el problema en otros lenguajes de programación.

El nombre de Matlab viene de MATrix LABoratory. Matlab fue originalmente escrito para facilitar el acceso al software de desarrollo de matrices de Linpack y Eispack. Hoy en día, los motores de Matlab incorporan las librerías de LAPACK Y Blas, integrando en una sola herramienta todo el arte en el software de la informática con matrices.

Matlab ha estado envuelto durante su desarrollo en un largo periodo de tiempo con muchos “inputs” de diferentes tipos de usuarios. En los ambientes universitarios, es la herramienta estándar para la introducción y posterior desarrollo más avanzado en las carreras de matemáticas, ingeniería y ciencias. En la industria, Matlab es una herramienta opcional para la investigación de alta productividad, el desarrollo y el análisis.

Matlab integra una familia de herramientas que complementan al programa matricial con diferentes funciones. Estas funciones, son muy importantes para la mayoría de los usuarios, ya que permiten aprender y aplicar tecnología más específica. Estas herramientas son colecciones integrales de funciones Matlab que extienden el entorno de Matlab para resolver toda clase de problemas particulares.

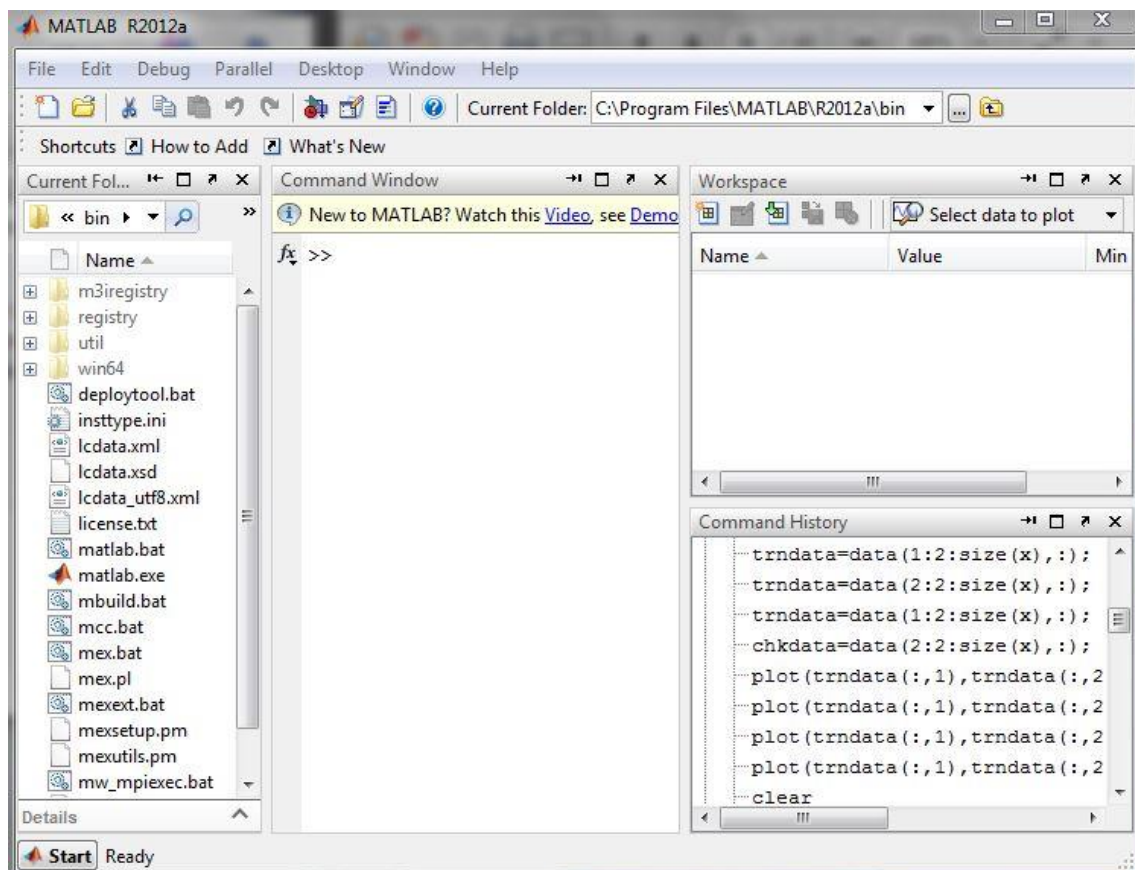


Figura 10. Ventana principal de Matlab

Quando inicias Matlab, lo primero que aparece es el escritorio, en el que puedes controlar los archivos, las variables, y las aplicaciones asociadas a Matlab. La **figura 10** muestra la ventana principal por defecto de Matlab. Esta ventana se puede modificar para personalizar y presentar las herramientas más usadas.

3. Sistema real

3.1 Descripción del proceso

El sistema en el que vamos a centrarnos, es una de las piezas claves dentro de la línea de producción. Durante la realización de las prácticas en la empresa se me dio la oportunidad de diseñar un nuevo controlador PID para uno de los mezcladores de la línea de producción.

El gran inconveniente que se tiene al trabajar con un sistema que está operando de manera continua en una producción real, es la imposibilidad de realizar pruebas con el mismo. Como regla invariable, se impuso no modificar el regulador ya existente en el mezclador. Normalmente, las pruebas conllevarían modificar tensiones, flujos y variables dentro del sistema de trabajo, y es algo que no se permite en estos casos. Además, sería necesario utilizar materia prima para realizar estas pruebas, algo que es aún más restrictivo que el propio uso del equipo, por tratarse de compuestos especiales y caros.



Figura 11. Sistema mezclador de fluidos.

En la **figura 11** podemos ver una imagen real del mezclador de la marca Sidel con el que se va trabajar [4]. Este mezclador dispone de tres entradas diferentes de fluidos, que son mezclados para enviarlos como uno solo a la línea de producción, donde la llenadora procederá a rellenar los envases correspondientes.

Este mezclador realiza diferentes tipos de mezcla dependiendo del tipo de producto final que se esté produciendo en cada momento. Los componentes de la mezcla son agua, jarabe y CO₂. El agua se adquiere a través del Canal de Isabel II, desde donde se envía a las depuradoras de la fábrica, donde se trata y eliminan los compuestos no deseados y perjudiciales para la producción. El jarabe se recibe desde los laboratorios de la misma fábrica, donde se realiza la mezcla de compuestos para la consecución del fluido requerido. Según los elementos mezclados, se varían el producto final y sus cualidades. El tercer compuesto que se mezcla es el CO₂ o “carbónico”, que se utiliza para agregar el gas a las bebidas.

El compuesto principal y restrictivo en este proceso de mezcla es el agua, pues es suministrado por las bombas instaladas en la depuradora, y estas pueden fallar y no suministrar todo el caudal necesario de producirse un gran uso repentino de agua. Esto ocurre cuando varias de las líneas de producción arrancan simultáneamente, para abastecerse de agua en todo el proceso, o cuando no se consiguen los suficientes litros de agua tratados para toda la instalación. El jarabe procede de los laboratorios, y es fabricado expresamente para la producción, por lo que se dispone de un suministro continuo hasta finalización del mismo, pues es con el que se calculan los litros de bebida final. El carbónico es suministrado por una empresa externa, que dispone de grandes tanques instalados en la fábrica, junto con equipos de presión, que se encargan de suministrar una presión constante en cualquier toma de la fábrica instalada en la fábrica.

Para evitar paradas por falta de suministro, que repercuten directamente en la producción y por tanto en la rentabilidad del proceso, el mezclador dispone de depósitos temporales, destinados al trabajo en continuo, un depósito independiente para el agua, el jarabe y el producto final. No es necesario un depósito para el carbónico, ya que su suministro es continuo y no se sufren pérdidas en el suministro. De existir pérdidas en el suministro de carbónico, la producción se detendría, ya que esto indicaría, o un fallo en el sistema de alimentación a la línea de producción, como podría ser una válvula o tubería rota, o que los depósitos se han vaciado.

En la **figura 12**, perteneciente al panel de control del mezclador, se puede ver una simplificación del sistema de mezcla. Al ser una fábrica real, en un sector muy competitivo, existe una política de privacidad estricta, y la información que se puede aportar al respecto está limitada. Toda la documentación existente referente a las máquinas, como son manuales, planos y documentos técnicos, no se ha podido aportar en este trabajo, por no existir documento electrónico al respecto, y no tener el permiso de realizar copias de los existentes en la fábrica.

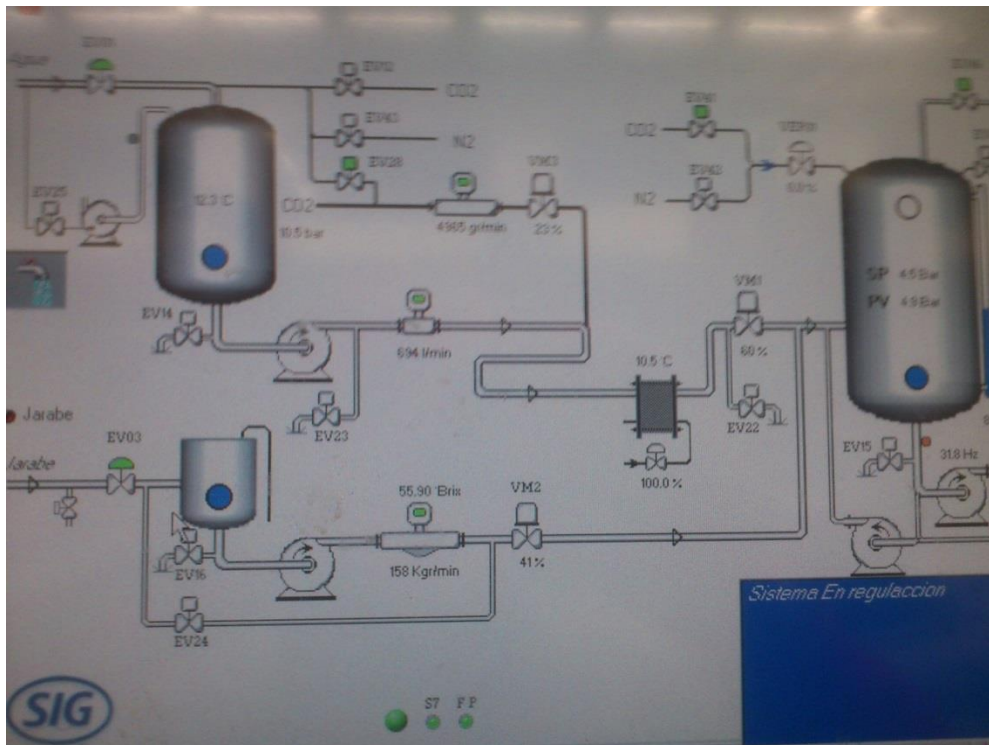


Figura 12. Panel de control del mezclador. Esquema del sistema.

Como se puede ver en la **figura 12** anteriormente citada, después de los depósitos de almacenaje, el caudal y presión se mantienen gracias a dos bombas centrífugas, cada una a la salida de los depósitos de agua y jarabe.

Cada una de las entradas a nuestro sistema, está monitorizada por un medidor para tener un control continuo del flujo instantáneo en las tuberías. En el caso del jarabe y el carbónico, son medidos por dos másicos, mientras que el flujo de agua se mide a través de un caudalímetro.

Estos datos medidos son los que se tienen en cuenta para realizar el control del proceso. Posterior al caudalímetro y los másicos se dispone una válvula que regula el caudal del fluido concreto, para respetar las cantidades de mezcla.

La primera mezcla se realiza en la salida del caudalímetro de agua, donde se introduce la primera parte del carbónico que compondrá la bebida final (la mayor parte del carbónico es agregado posteriormente durante el proceso de llenado de los envases en la llenadora). La cantidad de carbónico es regulada por una válvula proporcional al flujo instantáneo de agua.

Después de esta mezcla, el agua carbonatada pasa por un enfriador, que no es relevante en el proceso bajo nuestro punto de vista, pues no varía el flujo del fluido de manera perceptible, y llega a la válvula de control del flujo de agua. Posterior a la válvula de agua, se produce la mezcla con la salida de la válvula de jarabe.

Todas las válvulas están relacionadas con el flujo de agua de una u otra manera. La relación de la válvula de agua es clara. Las válvulas de carbónico y jarabe deben controlar el

flujo de su fluido correspondiente, teniendo en cuenta su propia entrada y salida objetivo, que depende del valor medido por el caudalímetro de agua en cada momento.

Como ya se mencionó, la válvula de carbónico es proporcional al flujo de agua. Se utiliza este tipo de válvula, porque la cantidad de carbónico agregada al agua en este punto es muy baja en relación a la que se le agrega posteriormente en la llenadora. Además, es esta última la que controla el nivel final de carbónico de la mezcla, por lo que la regulación fina del mismo es un proceso posterior. La relación de carbónico y agua es 4/1, entendiéndose esta relación debida a la diferencia entre gas y líquido.

El control del flujo de jarabe sí se realiza mediante un PID, que se calculará al igual que el de la válvula de agua, aparte de tener el control proporcional añadido para relacionarlo con el valor del agua en cada momento. Dependiendo del compuesto/bebida final que se vaya a producir, la relación entre el agua y el jarabe varía. Nosotros nos hemos basado en la bebida principal, y de la que más se produce. La relación para esta bebida es de 5.4/1, esto es, 5.4 partes de agua por cada una de jarabe.

De esta mezcla se obtiene el producto casi finalizado, que se almacena en un depósito desde el que se suministra a la llenadora. Posteriormente, en la llenadora se le agregará el carbónico necesario para dar por terminada la bebida, y se procederá a llenar los envases.

3.2. Componentes principales.

Para este proyecto, se van a considerar sólo los elementos principales que influyen en el proceso principal del mezclador, aquellos que son importantes para realizar el control del sistema. Esto son las bombas, caudalímetro, másicos y válvulas. Se consideran fuentes ilimitadas las entradas, ya que siempre que haya producción se dispondrá de ellas. El caudal de salida está estrictamente ligado a la entrada de agua, ya que es la entrada que puede llegar a variar su nivel, de manera restrictiva por las condiciones de suministro, y de cuyo flujo dependen el resto de entradas.

Como las válvulas se encuentran en la salida del caudalímetro, no hay pérdidas apreciables desde la señal de entrada con la que se trabaja, y el sistema de control, por ser la distancia recorrida en las tuberías despreciable, y las pérdidas en caudal por rozamiento en las tuberías no representativo.

3.2.1. Bombas

El mezclador dispone de cinco bombas centrífugas de la marca Hilge (**figura 13**). Existen dos bombas que controlan el sobrante de los depósitos de agua y producto terminado. De alcanzarse el máximo de estos depósitos, estas bombas harían recircular el fluido al conducto de entrada al depósito, de manera que al entrar este justo en la salida de las

válvulas, se reduce el volumen de mezcla, y se da la opción al sistema de vaciar el tanque en cuestión. Una tercera bomba se ocupa en enviar el producto final a la llenadora, y se encuentra a la salida del depósito correspondiente.



Figura 13. Bomba centrífuga instalada en el mezclador.

Las dos bombas que nos interesan para nuestro sistema son las correspondientes al agua y al jarabe. Estas bombas son las que nos marcan el flujo máximo que podemos tener en cada sección interna del mezclador. Las características generales están marcadas en la propia placa de las bombas, y con esta, se pueden identificar y buscar la información adicional en la página del fabricante [5], para poder mostrar y completar los manuales disponibles en la fábrica.

- Bomba de agua. Hygiana-III/2 Bloc-super. Esta bomba ofrece un caudal de $Q=20-35\text{m}^3/\text{h}$, a través de su motor trifásico de $P=22\text{ kW}$, con un $\cos\phi=0.92$.
- Bomba de jarabe. Hygiana-II/3 Bloc-super. Esta bomba ofrece un caudal de $Q=0-11\text{m}^3/\text{h}$, a través de su motor trifásico de $P=7.5\text{ kW}$, con un $\cos\phi=0.85$.

Como se puede ver, la bomba de agua es mayor que la de jarabe, para permitir suplir un caudal que corresponda con la relación entre los flujos de agua y jarabe.

3.2.2. Caudalímetro

El caudalímetro es la base del sistema, pues da la señal del flujo instantáneo de agua, que es nuestro fluido principal, lo que permite realizar el control. Se disponen de un caudalímetro para medir el flujo de agua.

El Caudalímetro de agua es de la marca Endress+Hauser Promag 53 (**figura 14**), modelo 53H50-2HOB1AAO2AB [6]. Este es un caudalímetro electromagnético, que calcula el flujo en

función del voltaje inducido por la velocidad del fluido al pasar a través del campo magnético generado. La salida es analógica, de 4-20mA, con una resolución de 0.5 μ A.



Figura 14. Caudalímetro Endress+Hauser para el flujo de agua.

3.2.3. Másicos

Disponemos de dos sensores másicos, para la medida de carbónico y del jarabe. Ambos son másicos Micro Motion, de la marca Emerson [7] (**Figura 15**).

Ambos sensores son del tipo “Elite Sensor”, con las mismas características. Están calibrados con 0.10% para flujos de masa y 0.5 kg/m³ para densidades. El másico de carbónico se corresponde con el código CMF050M322NRASZZZ, que nos indica, aparte de lo indicado anteriormente, las dimensiones del conducto del sensor, de 13 a 25 mm. El másico de jarabe es CMF200M351NRANSZZZ, con dimensiones de 50 a 75 mm.



Figura 15. Másicos para Jarabe y carbónico.

3.2.4. Válvulas

Tenemos 3 válvulas en nuestro sistema a controlar, una por cada uno de los fluidos de control, diferenciándose en dos tipos. El agua y el jarabe se controlan a través de válvulas Moog [8], de la serie 79 [9] (**figura 16, 17**). El carbónico se mide a través de una válvula proporcional Norgren, modelo VP23 [10] (**figura 18**).



Figura 16. Válvula Moog, serie 79.

- Válvula agua, modelo 79-2013H80FOQO0V5L7, es una válvula que opera con un caudal máximo de 200gpm, lo que son $45.41 \text{ m}^3/\text{h}$ en sistema internacional, que supera el máximo que puede suministrar la bomba de agua, para evitar sobreesfuerzos. Esta válvula tiene un tiempo de respuesta de 15 ms, para mejorar el control sobre los caudales.

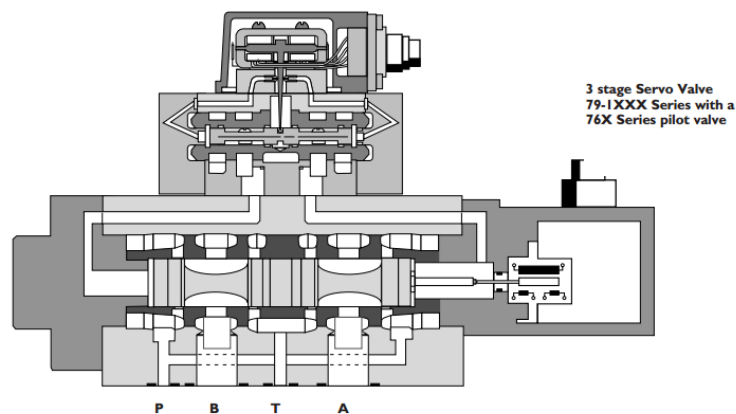


Figura 17. Válvula Moog, serie 79, corte transversal.

- Válvula jarabe, modelo 79-1007H25FOQO0V5L7, opera con un caudal máximo de 60gpm, que en sistema internacional son $13.62 \text{ m}^3/\text{h}$, superando el valor de la bomba correspondiente. Las características técnicas generales, son las mismas, pues ambas pertenecen a la misma serie, con la misma combinación de cualidades. La principal diferencia es el caudal, ya nombrado, y el tiempo de respuesta, que

sería de 14 ms en este modelo, que como vemos, es inferior al de la válvula de agua, debido también a que el caudal que puede permitir es menor.

- Válvula de carbónico, modelo VP2310BR461MB201, permite un flujo de caudal de 0-20000 l/min. El caudal máximo de carbónico que va a necesitar la instalación es de 3800 l/min, lo que nos aporta un margen de seguridad amplio, para evitar grandes variaciones en la presión, y que puedan producirse problemas en el proceso.



Figura 18. Válvula Norgren, para carbónico.

4. Diseño

4.1. Creación del sistema.

Una vez definido el sistema a controlar y sus componentes, tenemos que crear la función de transferencia que simule nuestro sistema, para poder desarrollar el PID de control. Evaluando el sistema, de los tres elementos que lo componen, alimentación, medida y control directo, nos abre la opción de dos tipos de control.

Un primer control que se puede plantear cuando se tiene este tipo de sistema, es realizar un control desde las bombas, controlando el flujo proporcionado por estas, y luego realizar un segundo control más fino gracias a la válvula. Para realizar esto debemos tener la información completa en referencia a las bombas y a las válvulas. Como disponemos de esta información, el siguiente paso sería comprobar qué utilizar en Matlab para simular un sistema de estas características.

Tras un primer análisis y revisión de las bombas, se comprueba que este primer planteamiento no es factible, debido a que las bombas no permiten realizar un control de este tipo. Las bombas son todo o nada, alternando su estado entre ambos para conseguir el flujo deseado. Decir que las bombas son todo o nada no sería del todo correcto, ya que estas tienen un margen de trabajo en continuo, manteniéndose cercano a su valor máximo. Esto quiere decir que no pueden asumir aportar un caudal demasiado bajo, cuando esto ocurre, las bombas paran. En el caso de la bomba de agua es muy claro, ya que el caudal que puede aportar va de 20 a 35 m³/h, no pudiendo aportar menos de 20 m³/h salvo en el arranque. La bomba de jarabe, al ser más pequeña, tiene este caudal menor admitido, pero no es recomendado por el fabricante.

Como comprobación de esto, se revisó el funcionamiento del mezclador, junto con un técnico de la fábrica. Tras analizar el funcionamiento e informar al técnico de la razón del análisis, confirmó que este funcionamiento no es posible, por la propia limitación de funcionamiento de las bombas. Como consideración adicional para explicar este funcionamiento, cuando se tiene un proceso continuo, los casos en los que hay que reducir tanto el valor del flujo, como para que la producción se reduzca de esta manera, se debe a una falta de suministro o a un exceso de producto final. En cualquiera de los dos casos, la instalación pararía, y volvería a arrancar de nuevo cuando se necesitase de nuevo iniciar el proceso.

Con esto nos queda la segunda opción, que es centrar el control en las válvulas. Para poder realizar esto debemos obtener una función de transferencia que responda igual que las válvulas. El primer paso teórico para conseguir esto, sería conectar la válvula a una entrada y realizar pruebas con ella, obtener una respuesta, analizarla y obtener el valor de las variables que necesitamos. De este análisis podríamos obtener un sistema que colocar en Matlab y con el que empezar a trabajar.

Como ya se ha descrito anteriormente, al ser un sistema real, la primera condición para permitirme realizar este trabajo, fue que podía ni probar con los elementos del mezclador, y modificar los valores del mismo. Por supuesto, no obtuvimos aprobación para realizar estas pruebas, para evitar posibles daños a las válvulas, y no malgastar materiales de producción en realizar una prueba. Esta es una de las restricciones más importantes de este trabajo, la imposibilidad de trabajar con el sistema real, teniendo que realizar todo a través de simulaciones a través de los datos teóricos que figuran en los documentos de la biblioteca de la fábrica, así como los recursos web del fabricante.

Como ya se ha mencionado, se tiene que realizar un cálculo de dos controladores PID, uno para el agua y otro para el jarabe, ya que el carbónico, se regula directamente a través de una válvula proporcional en función del caudal de agua. Ambas válvulas son del fabricante Moog, el cual tiene un documento de referencia para el cálculo de las funciones de transferencia de sus válvulas [11]. Este documento ha sido utilizado como referencia en muchos trabajos relacionados con este tema, y he de aclarar que también se encontraba de manera física en la biblioteca de la fábrica.

En este documento se analiza el tipo de respuesta asociado a una servo válvula. Este tipo de respuesta varía en función de la válvula y del punto de interés. Tal y como se explica en el documento [11], cuando se puede aceptar una respuesta en torno a 45º de fase, y este corresponde a la frecuencia de 50 cps, podemos aproximar la servo válvula a un sistema de primer orden. En cambio, si necesitamos una respuesta más eficiente, con efectos dinámicos más altos, y una respuesta en torno a 90º de fase, sería necesario aproximar a través de un sistema de segundo orden.

Para tomar la decisión en cuanto a qué sistema utilizar, si uno de primer orden o uno de segundo, utilizamos el documento general del fabricante en referencia a las válvulas instaladas [8] y el datasheet concreto de las válvulas instaladas [9]. Según el fabricante, para determinar la respuesta dinámica de las válvulas es necesario medir la frecuencia en la fase de 90º. Con esto, tenemos resuelto el primer inconveniente, qué sistema utilizar para simular las válvulas. Utilizaremos un sistema de segundo orden como el siguiente:

$$G(s) = K * \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{2\xi}{\omega_n} \right) s + \left(\frac{s}{\omega_n} \right)^2} \right)$$

Para calcular la función de transferencia de la válvula, tenemos tres incógnitas que encontrar, K (ganancia del sistema), ω_n (frecuencia natural no amortiguada) y ξ (coeficiente de amortiguamiento). Para encontrar estas incógnitas cogemos el diagrama de BODE con la respuesta dinámica de la válvula de agua, que vemos en la **figura 19**. En este diagrama de BODE tenemos la ganancia del sistema indicada a directamente, la cual es $K_{\text{agua}} = 620 \text{ sec}^{-1}$.

La frecuencia natural no amortiguada la calculamos utilizando la fórmula $\omega_n = 2\pi f_n$. De la **figura 19** podemos obtener la frecuencia cuando la respuesta de la válvula realiza una apertura completa al 100% y alcanza los 90º indicados por el fabricante, obteniendo en este caso $f_n = 65 \text{ Hz}$. Con esta frecuencia, calculamos la frecuencia natural no amortiguada:

$$\omega_n = 2\pi f_n = 2\pi * 65 = 408.4 \text{ s}^{-1}$$

El valor de ξ estaba escrito en el manual de la válvula, donde figuraba $\xi = 0.95$. Este valor fue confirmado por los técnicos de la fábrica, que afirmaron que fue el técnico instalador del mezclador el que dejó apuntado el valor. Para confirmar esto, se realizó una llamada telefónica al fabricante. El representante de la marca en España no supo confirmar la información, y hubo que llamar al distribuidor en Alemania, que confirmó el valor como cierto para todos los modelos de estas válvulas.

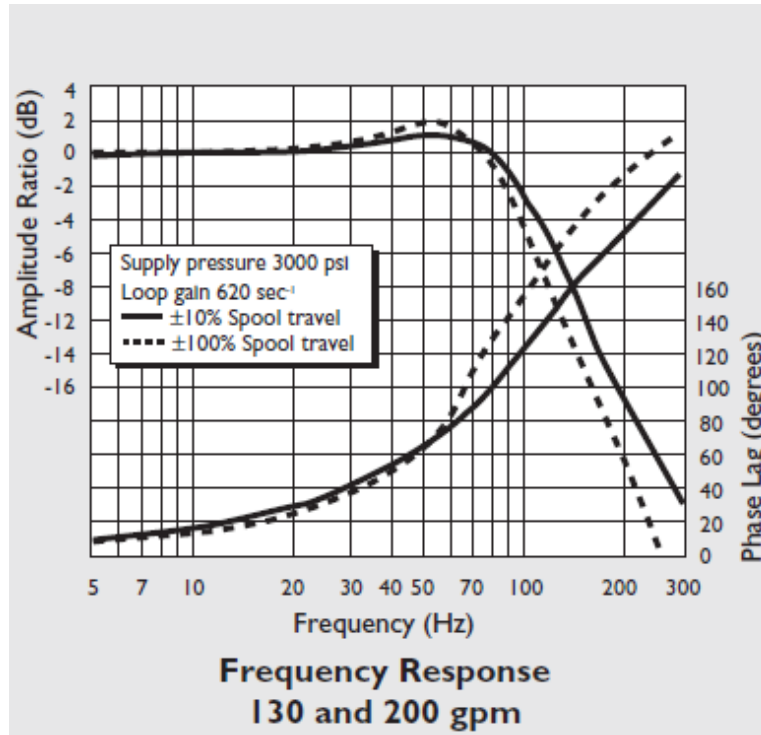


Figura 19. Diagrama BODE con respuesta dinámica, válvula de agua.

Con estos valores, la función de transferencia de la válvula de agua queda de la siguiente manera:

$$VA(s) = 620 * \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{2 * 0.95}{408.4} \right) s + \left(\frac{s}{408.4} \right)^2} \right)$$

Poniéndolo de manera más manejable:

$$VA(s) = \frac{K * \omega_n^2}{\omega_n^2 + 2\xi * \omega_n * s + s^2} = \frac{620 * 408.4^2}{408.4^2 + 2 * 0.95 * 408.4 * s + s^2}$$

$$VA(s) = \frac{1.034 \times 10^8}{s^2 + 776s + 1.668 \times 10^5}$$

Para calcular la función de transferencia de correspondiente a la válvula de jarabe, seguimos los mismos pasos que con la válvula de agua. En la **figura 20** podemos ver el diagrama de BODE de la respuesta dinámica de la válvula de jarabe. De este diagrama sacamos que $f_n = 60$ Hz, por lo tanto:

$$\omega_n = 2\pi f_n = 2\pi * 60 = 376.99 \text{ s}^{-1}$$

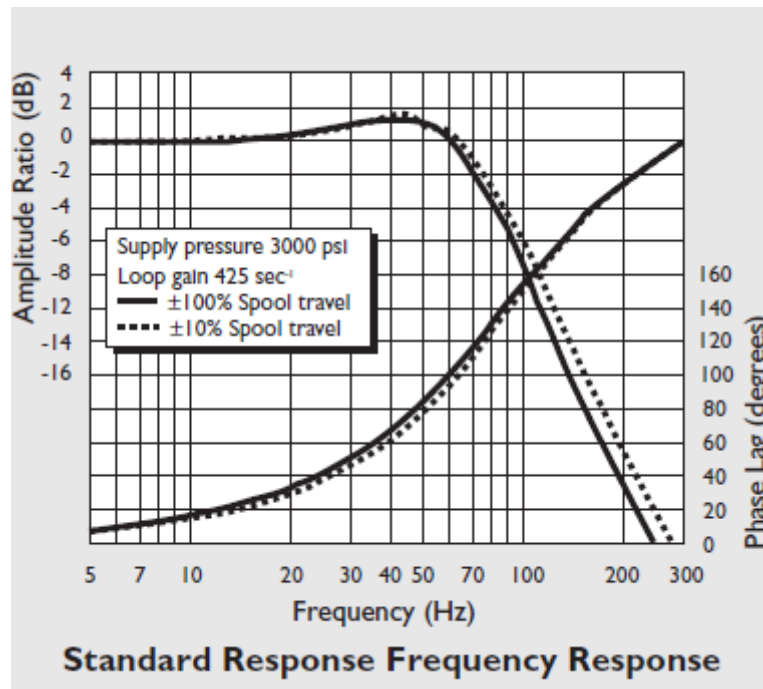


Figura 20. Diagrama BODE con respuesta dinámica, válvula de jarabe.

La ganancia para este sistema es de $K_{jarabe} = 425 \text{ sec}^{-1}$, y la $\xi = 0.95$, igual que en la válvula para el agua, ya que pertenecen a la misma familia. Con estos datos, obtenemos la función de transferencia para la válvula de jarabe:

$$VJ(s) = \frac{K * \omega_n^2}{\omega_n^2 + 2\xi * \omega_n * s + s^2} = \frac{425 * 376.99^2}{376.99^2 + 2 * 0.95 * 376.99 * s + s^2}$$

$$VJ(s) = \frac{6.04 \times 10^7}{s^2 + 716.3s + 1.421 \times 10^5}$$

Una vez calculadas las funciones de transferencia correspondientes a cada válvula, hay que analizar si son funciones válidas o no. Para realizar esto, se calculan los polos de cada una de ellas. Utilizamos Matlab para el cálculo, se puede directamente el polinomio del denominador, y llamar al comando "roots", para hallar las raíces. Como la implementación se ha realizado con código, esta parte está incluida dentro del mismo. Para que Matlab nos devuelva los polos correspondientes, solo tenemos que solicitar la variable "pVA" y "pVJ", después de haber lanzado el código correspondiente.

```
pVA =  
  
1.0e+02 *  
  
-3.8799 + 1.2753i  
-3.8799 - 1.2753i
```

Figura 21. Polos de la función de transferencia VA.

Como se ve en la **figura 21**, para esta VA existen dos polos negativos conjugados en $-387.99 \pm 127.53i$, por lo que el sistema es estable, y podemos trabajar con él.

```
pVJ =  
  
1.0e+02 *  
  
-3.5814 + 1.1772i  
-3.5814 - 1.1772i
```

Figura 22. Polos de la función de transferencia VJ.

La función de transferencia VJ tiene dos polos negativos conjugados en $-358.14 \pm 117.72i$ (**figura 22**), por lo tanto, esta función de transferencia también es estable y podemos trabajar con ella.

Una vez calculadas las funciones de transferencia correspondientes a las válvulas, el siguiente paso es calcular los PID correspondientes a cada una de ellas.

4.2. Diseño de los PID

Para el diseño de los reguladores PID de las válvulas vamos a utilizar el programa Matlab para realizar los cálculos y obtener los esquemas del desarrollo. Para este proceso, se van a utilizar las reglas de Ziegler-Nichols de sintonización de controladores PID.

Ziegler y Nichols propusieron una serie de reglas para poder determinar, a partir de la respuesta de un sistema, los valores que permiten la configuración de su controlador, K_p (ganancia proporcional), T_i (tiempo integral) y T_d (tiempo derivativo). La determinación de estos parámetros se suele realizar en el sitio por parte de los ingenieros. Dado que nosotros no podemos optar a trabajar con el sistema real, vamos a utilizar las funciones de transferencia que son equivalentes a este sistema para realizar el control.

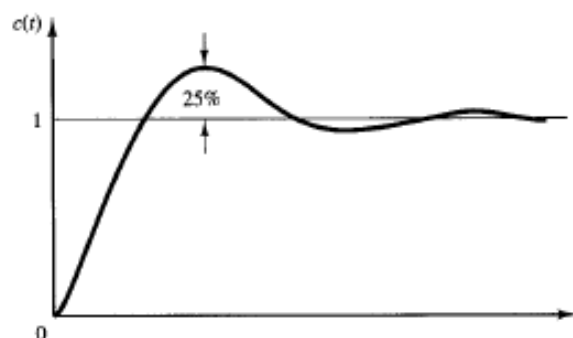


Figura 23. Respuesta teórica a obtener con los métodos de Ziegler-Nichols. Sobrepaso máximo de un 25%.

Existen dos métodos distintos que se denominan reglas de sintonización de Ziegler-Nichols. En la bibliografía, en el libro de Ogata [2], podemos encontrarlas. Ambos métodos

pretenden obtener un 25% de sobrepaso máximo en la respuesta escalón, de igual manera que vemos en la **figura 23**.

Nosotros vamos a utilizar el primer método, para lo cual hay que calcular la respuesta de nuestro sistema a una entrada escalón. La respuesta de nuestro sistema debe tener un aspecto similar del que podemos ver en la **figura 24**, una curva con forma de S.

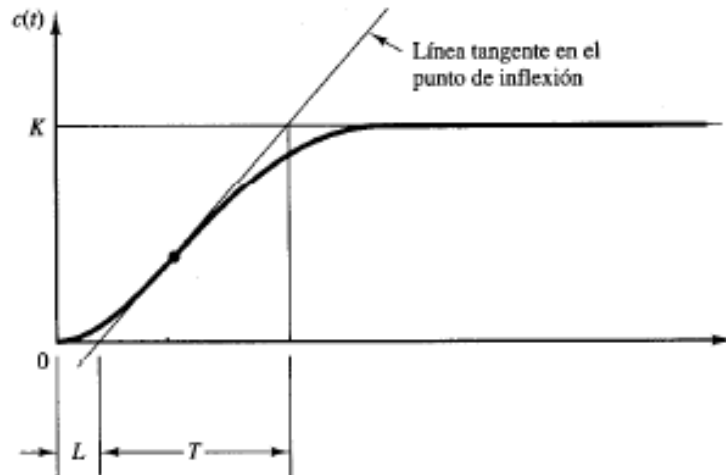


Figura 24. Respuesta teórica a entrada a escalón de un sistema, para cálculo de Ziegler-Nichols.

Esta curva se caracteriza por dos parámetros, el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T , tal y como vemos en la **figura 24**. Para calcular estos parámetros se traza una línea tangente en el punto de inflexión de la curva generada por la respuesta de nuestro sistema. Determinando la intersección de esta recta tangente con el eje de tiempo y con la línea de estabilización del sistema, que debería ser el valor de la ganancia del sistema.

Con estas variables, Ziegler y Nichols establecieron unos valores teóricos iniciales para K_p , T_i y T_d según el cuadro de la **figura 25**.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Figura 25. Reglas de sintonización de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta.

Con este método obtenemos la una función de transferencia correspondiente al controlador PID teórico inicial a calcular. Este controlador tiene la siguiente estructura:

$$G(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$$

Con esta información, y dado que ya hemos calculado nuestras funciones de transferencia en el capítulo anterior, podemos empezar a calcular los reguladores PID.

Vamos a comenzar con la válvula de agua, y su función de transferencia:

$$VA(s) = \frac{1.034 \times 10^8}{s^2 + 776s + 1.668 \times 10^5}$$

```
kv=620;
fn=65;
wn=2*3.141593*fn;
chi=0.95;
VA=tf(kv*wn^2,[1 2*chi*wn wn^2]);
pVA=pole(VA); %Calculamos los polos del sistema
Kva=(kv*wn^2)/(wn^2); %Ganancia del sistema
figure(1)
pzmap(VA) %obtenemos los polos de H gráficamente para ver si
grid on %podemos trabajar con ella, si es estable.
dt=0.0005; %Creamos una constante de tiempos
t=0:dt:0.03; %Creamos la matriz de incrementos
y=step(VA,t)'; %Función de respuesta al escalón
dy=diff(y)/dt; %Derivada de la función
[m,p]=max(dy); %Punto de inflexión de la función
yi=y(p); %Valor de y en el punto de inflexión calculado
ti=t(p); %Tiempo en que ocurre el punto de inflexión
L=ti-yi/m; %Valor del retardo
T=(y(end)-yi)/m+ti-L; %Constante de tiempo
figure(2)
plot(t,y,'b',[0 L L+T t(end)],[0 0 y(end) y(end)],'k')
title('Respuesta al escalón')
ylabel('Amplitud')
xlabel('tiempo(s)')
legend('Exacta','Aproximación lineal')
```

Figura 26. Código para calcular las variables principales de Ziegler-Nichols.

Para todo el cálculo se ha implementado un código sencillo en Matlab, que permite el cálculo de toda la información necesaria del sistema y de los controladores (**figura 26**). Lo primero que realizamos es la introducción de la función de transferencia, y el cálculo de sus polos, que utilizamos para ver la estabilidad del sistema. A continuación realizamos la graficación de los polos del sistema con el comando pzmap, la solución puede verse en la **figura 27**.

Como vamos a aplicar el primer método de Ziegler-Nichols, tenemos que comprobar el tipo de respuesta a una función escalón que tiene el sistema. Si no fuese una respuesta en forma de S, no sería válida. Aprovechamos y en la misma gráfica, vamos a realizar los cálculos para representar la recta tangente a esta respuesta. Como vemos en el código, lo primero que

hacemos es crear un vector de tiempo, para simular, del modo $t=Ti:dt:Tf$. Ponemos como base de tiempo $dt=0.0005$, para tener mayor precisión, y llegamos hasta el tiempo final 0.03, que es suficiente para ver la forma final del sistema.

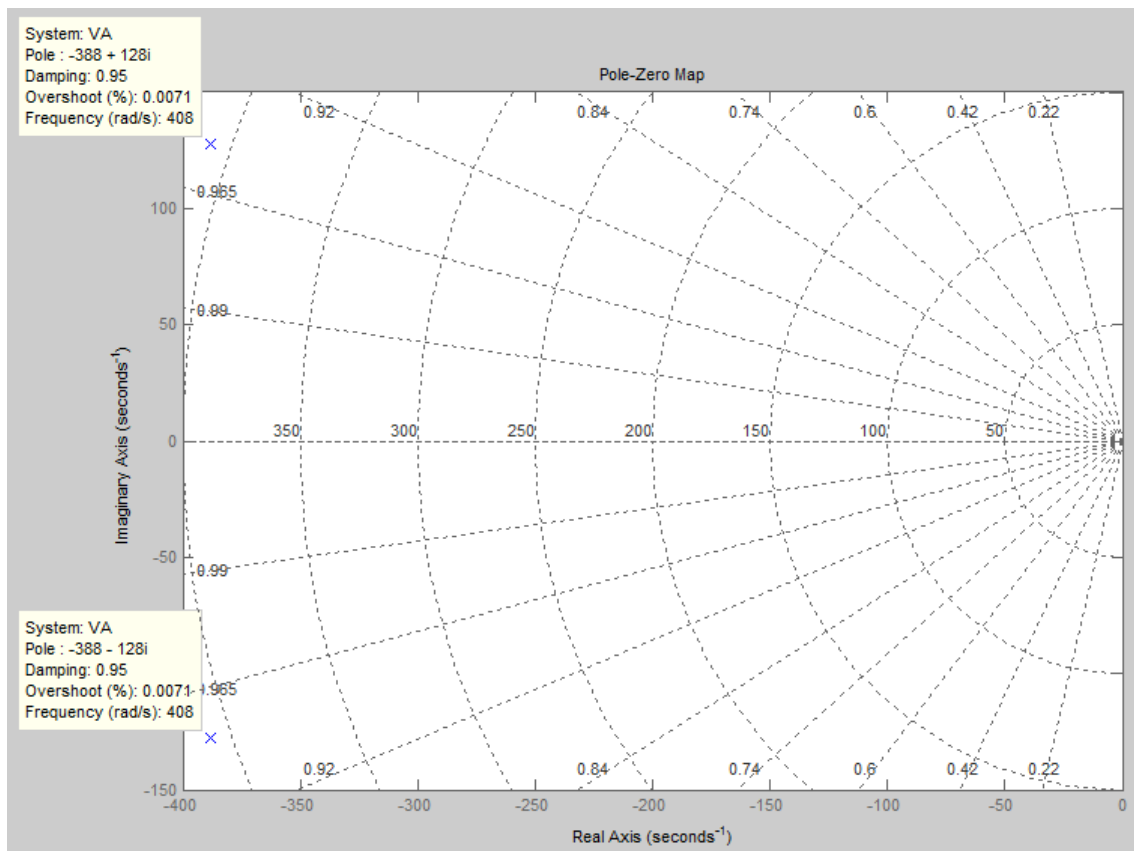


Figura 27. Polos de la válvula de agua.

Lo que hacemos es guardar la respuesta a escalón de nuestro sistema, con la base de tiempos establecida, en un vector, en este caso “y”, sobre el que haremos los cálculos de las variables de Ziegler-Nichols. Como se indicó, hay que calcular la recta tangente al punto de inflexión, para esto utilizamos el comando “diff”, que calcula la diferencia entre valores consecutivos de “y”, dividimos por la variable de tiempo esta resta, y tenemos la derivada de “y” guardada en “dy”.

Para calcular el punto de inflexión, utilizamos el comando de Matlab “max”, que nos devuelve el punto máximo de la derivada. Una vez tenemos el punto de inflexión, calculamos el valor de “y” en ese punto, y de “t”, estas son las variables “y_i” y “t_i”. Para calcular el retardo del sistema, cogemos la ecuación de la recta. El retardo del sistema “L”, sería igual al tiempo del punto de inflexión, menos el tiempo que tarda en alcanzar este punto el sistema, esto es $L = t_i - y_i/m$.

Para calcular la constante de tiempo “T”, trabajamos de igual manera. Calculamos el tiempo que tarda en alcanzarse el máximo desde el punto de inflexión con $(y(end)-y(i))/m$, y luego sumamos el tiempo que ha tardado en alcanzar este punto de inflexión, “t_i – L”.

Por último graficamos los resultados según la línea de comando "`plot(t,y,'b',[0 L L + T t(end)], [0 0 y(end) y(end)], 'k')`", obteniendo la **figura 28**.

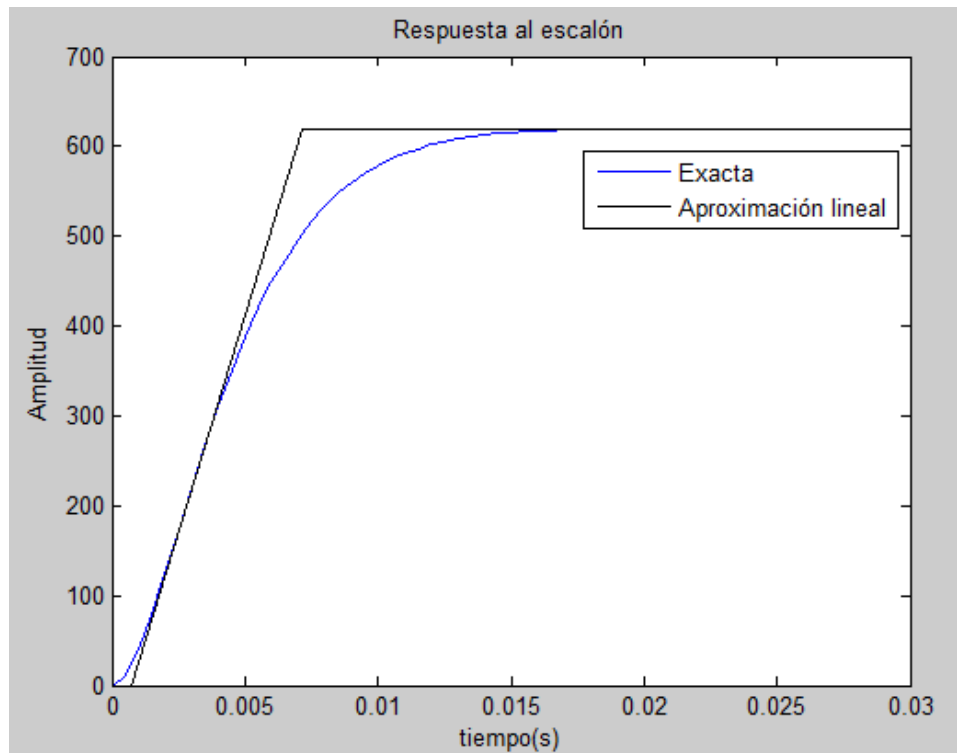


Figura 28. Respuesta a escalón de la válvula de agua.

Como podemos apreciar, la forma que tiene la respuesta de este sistema es en forma de S, tal y como indica el criterio de Ziegler-Nichols. Como esto se cumple, podemos proceder al cálculo de las variables según Ziegler-Nichols. El retardo y la constante de tiempo ya las tenemos calculadas, si solicitamos esta información a Matlab, obtenemos los siguientes valores:

$$L = 6.96 \times 10^{-4} \text{ sec}$$

$$T = 0.0065 \text{ sec}$$

Para el cálculo las variables de Ziegler-Nichols utilizamos el código que vemos en la **figura 29**. En este código utilizamos las fórmulas que aparecen en el la **figura 25** sugeridas por Ziegler-Nichols para el cálculo de la primera aproximación al controlador.

```
%Cálculo de variables iniciales de Z-N
Kp=1.2*T/L;
Ti=2*L;
Td=0.5*L;
Ki=Kp/Ti;
Kd=Kp*Td;
CT=tf([Kd Kp Ki],[1 0]); %Controlador inicial PID
```

Figura 29. Calculo de variables iniciales de Z-N.

Según estas ecuaciones obtenemos los siguientes valores para nuestro sistema:

$$K_p = 1.2 * \frac{T}{L} = 11.1682$$

$$T_i = 2 * L = 0.0014$$

$$T_d = 0.5 * L = 3.4801 \times 10^{-4}$$

Dados estos valores podemos calcular la función de transferencia del controlador según Ziegler-Nichols. Como se ve en el código, no utilizamos la fórmula genérica, en la que figuran los tiempos integrales y derivativos, si no que utilizamos las ganancias calculadas según:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = 8.0228 \times 10^3$$

$$K_d = K_d * T_d = 0.0039$$

De la función estándar de Ziegler-Nichols, utilizamos una más compacta, que haga la programación más sencilla:

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

$$CE_{va}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} = \frac{0.003887 s^2 + 11.17 s + 8023}{s}$$

Una vez calculada la primera aproximación a nuestro PID, podemos ver cuál sería el aspecto de nuestro sistema controlado por este primer PID aproximado (**figura 30**).

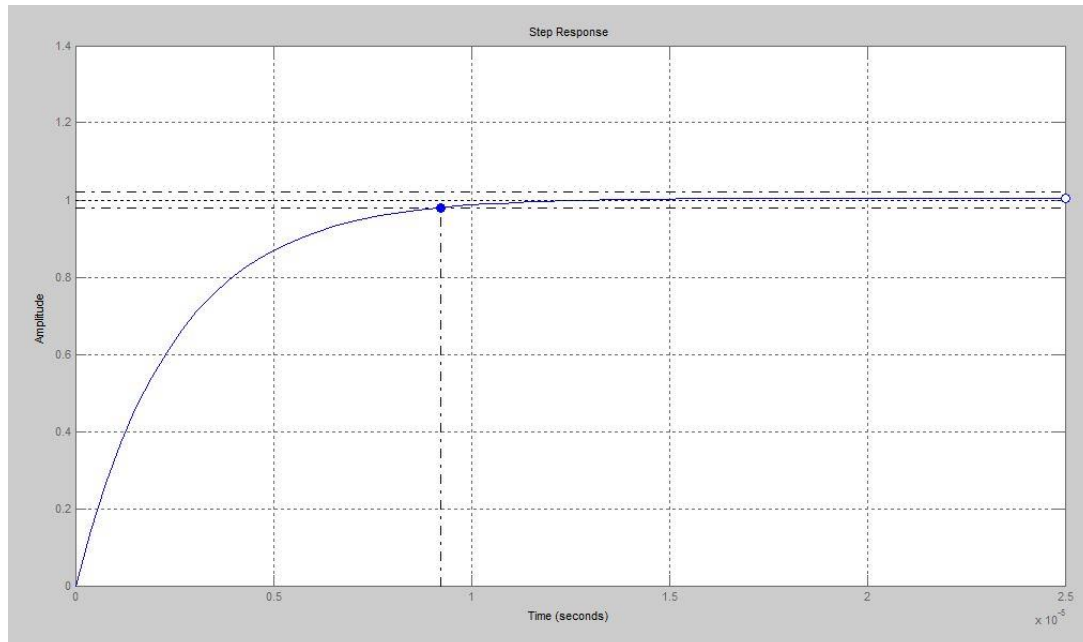


Figura 30. Respuesta del sistema en lazo cerrado con el PID inicial.

De este gráfico podemos obtener el tiempo de establecimiento y el valor pico de la amplitud. El tiempo de establecimiento para este sistema es de $t_s = 9.22 \times 10^{-6}$ y el sobrepaso máximo es de $M_p = 1$. Este sistema no presenta sobre oscilación dado el alto valor de ξ , y se comporta de manera similar a un sistema críticamente amortiguado.

Este cálculo lo hemos realizado con el código que aparece en la **figura 31**, en la que utilizamos la función feedback para calcular la realimentación.

```
%Lazo cerrado
VALC=feedback(CT*VA,1); %función en lazo cerrado
figure(3)
step(VALC) %Obtenemos respuesta del sistema ante señal escalón
grid %Ponemos cuadrícula al gráfico
```

Figura 31. Función en lazo cerrado para la primera aproximación de Ziegler-Nichols.

Con este sistema lo que vamos a intentar es mejorar la respuesta, de manera que tenga una respuesta más rápida y precisa.

Para ver cómo afecta cada una las señales de control, vamos a realizar unas comprobaciones exageradas con el sistema. Ya que no tenemos riesgo de rotura, podemos forzar la función de transferencia más allá de lo que podríamos forzar el sistema real, caso que utilizaremos a nuestro favor. Para esto vamos a utilizar una constantes experimentales del regulador PID calculado inicialmente con Ziegler-Nichols, y lo vamos a representar en conjunto (**figura 32**).

```
%Controlador modificado
Kpe=5*Kp;
Kie=Ki;
Kde=Kd;
CE=tf([Kde Kpe Kie],[1 0]); %Controlador experimental PID
VALCE=feedback(CE*VA,1); %función en lazo cerrado
figure(4)
step(VALC,VALCE) %Obtenemos respuesta del sistema regulado con ambos PID
                  %ante señal escalón
legend('PID-ZN','PID-ZNe')
grid %Ponemos cuadrícula al gráfico
```

Figura 32. Calculo de nuevo controlador PID a partir del calculado por Ziegler-Nichols.

En primer lugar vamos a aumentar la constante proporcional, de modo que podamos analizar su efecto en el sistema. Vamos a ver a continuación dos figuras, la **figura 33** y la **figura 34**, en las que la constante proporcional experimental, K_{pe} , toma valores de 5 y 10 veces K_p , respectivamente.

Según podemos apreciar en las imágenes, cuanto más aumentamos la ganancia proporcional, aumentamos el pico del sistema, y aceleramos la respuesta, pero en contra partida hacemos que el tiempo de establecimiento sea mayor.

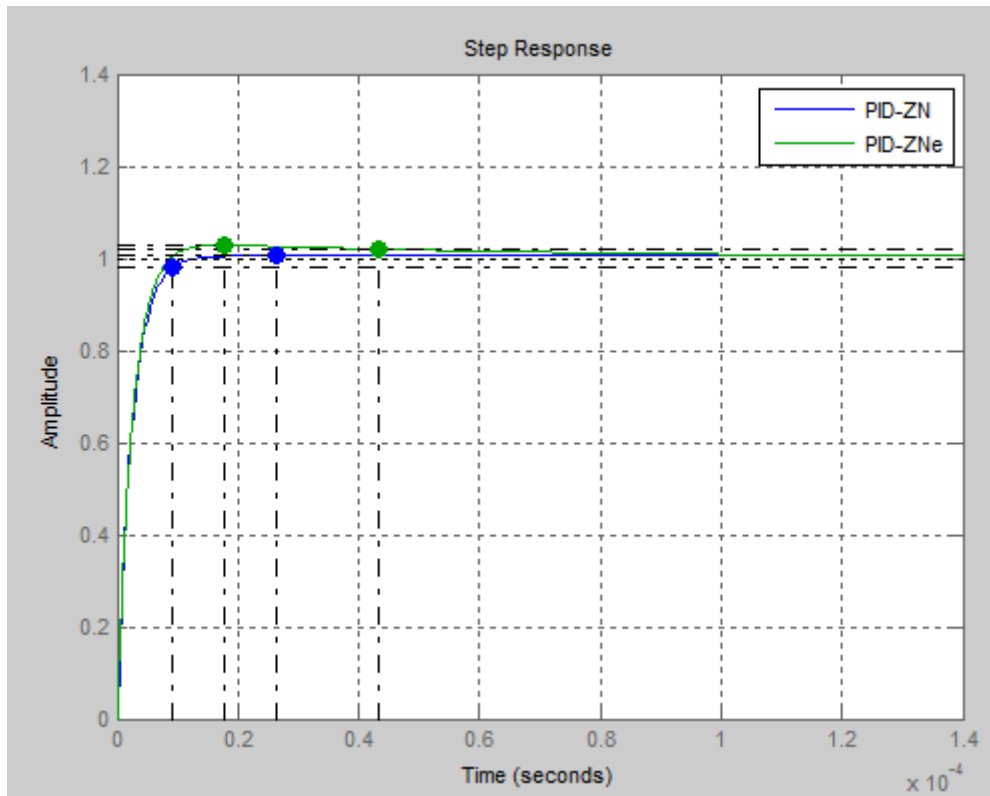


Figura 33. Respuesta a PID con $K_{pe}=5 \cdot K_p$.

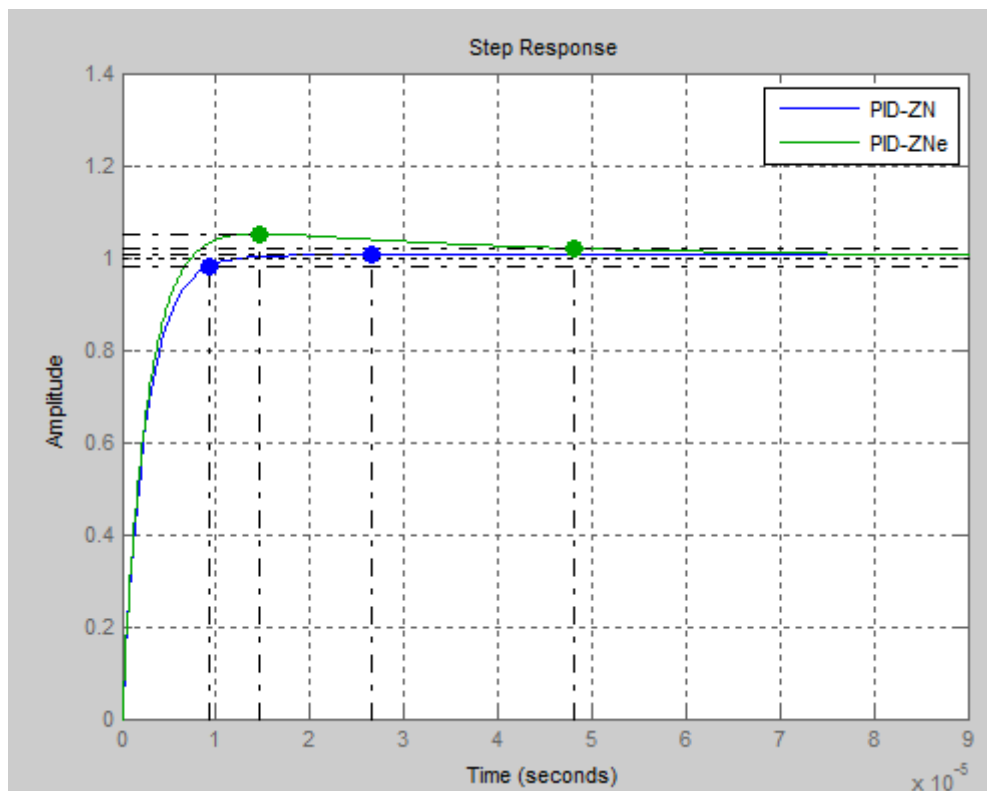


Figura 34. Respuesta a PID con $K_{pe}=10 \cdot K_p$.

Si en cambio, probamos a disminuir la ganancia proporcional, de modo que K_{pe} sea igual a $0.5K_p$, obtenemos la respuesta que podemos ver en la **figuras 35**.

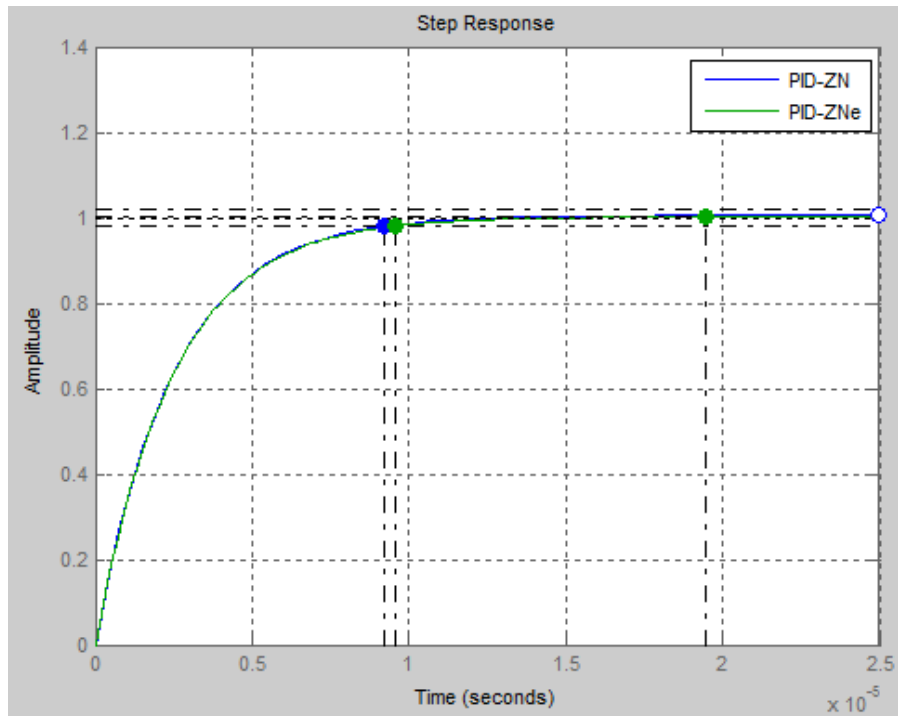


Figura 35. Respuesta a PID con $K_{pe}=0.5 \cdot K_p$.

Podemos ver que si disminuimos la constante proporcional, la respuesta del sistema no presenta una gran diferencia con respecto al PID calculado por métodos de Ziegler-Nichols. Por lo tanto, podemos asumir que el disminuir la K_{pe} no tiene un efecto significativo en la respuesta del sistema. Mientras que aumentando K_{pe} podemos mejorar el tiempo y valor de la respuesta, haciendo que se alcance más rápido el máximo del sistema, pero en contra parte, el tiempo de establecimiento se hace mayor.

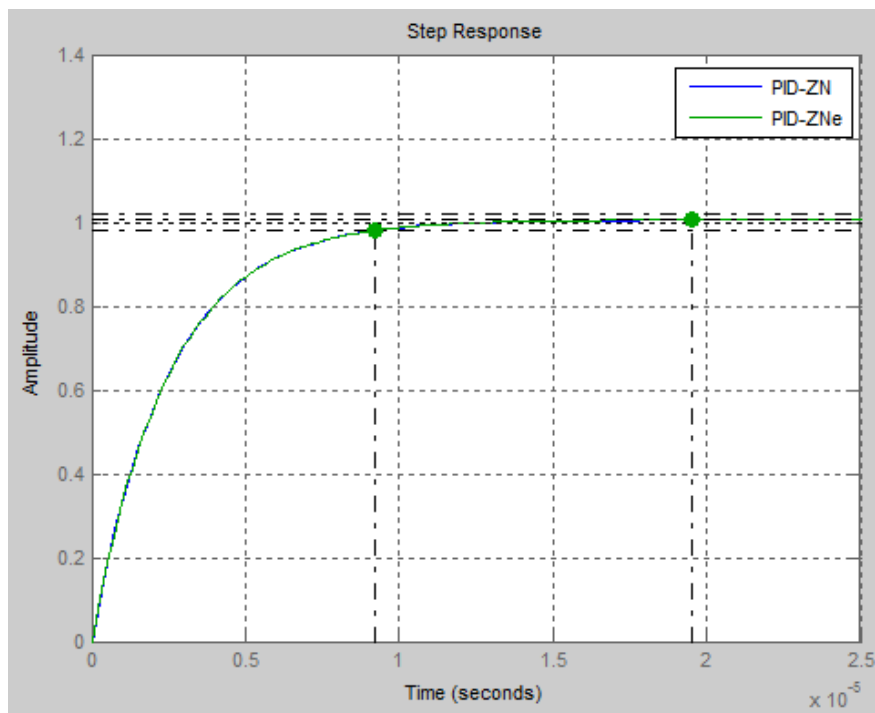


Figura 36. Respuesta PID con $K_{ie}=10 \cdot K_{ie}$.

Ahora vamos a estudiar la relación de K_{ie} y el sistema. Para esto, vamos a aumentar la K_{ie} , de modo que $K_{ie}=10*K_i$. Hay que tener en cuenta que K_i tiene un valor elevado, 8022.7. En la **figura 36** podemos ver la respuesta asociada.

Como podemos ver, no tenemos una gran variación, dado el gran valor que tiene esta ganancia, el único cambio apreciable es que el tiempo de pico del sistema se reduce con respecto al original.

Ahora vamos a reducir K_{ie} , utilizando $K_{ie}=0.5*K_i$. La respuesta asociada a esta nueva constante, podemos verla en la **figura 37**. Tal y como vemos, disminuir K_{ie} no tiene demasiados resultados. Esto se debe a que es un sistema que se comporta de manera similar a un sistema críticamente amortiguado, ya que la acción integral se agrega para eliminar un error u offset en la respuesta, como el sistema tiende a no oscilar, no se produce esta variación en el área bajo la curva que necesite de la activación de la acción integral.

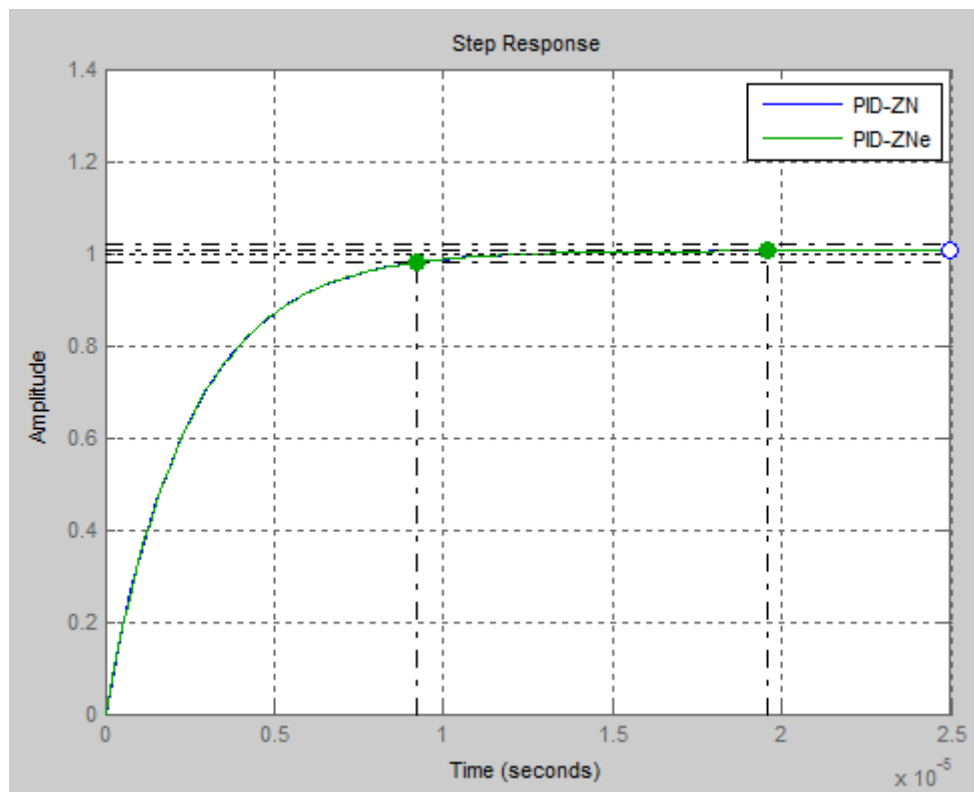


Figura 37. Respuesta PID con $K_{ie}=0.5*K_i$.

Por último, vamos a analizar la relación de K_{de} con el sistema. De igual modo que hemos calculado con el resto de ganancias, vamos a aumentar y reducir esta para ver la respuesta del sistema. A la hora de aumentar, tenemos que tener cuidado de no crear una K_{de} que esté por encima del valor K_{pe} , para evitar problemas de estabilidad en el sistema.

El valor de K_d es de 0.0039, por lo que vamos a probar a aumentar de paulatinamente K_{de} . En este ejemplo, vamos a probar con una $K_{de}=2*K_d$, y $K_{de}=10*K_d$, que podemos ver en las **figuras 38 y 39** respectivamente.

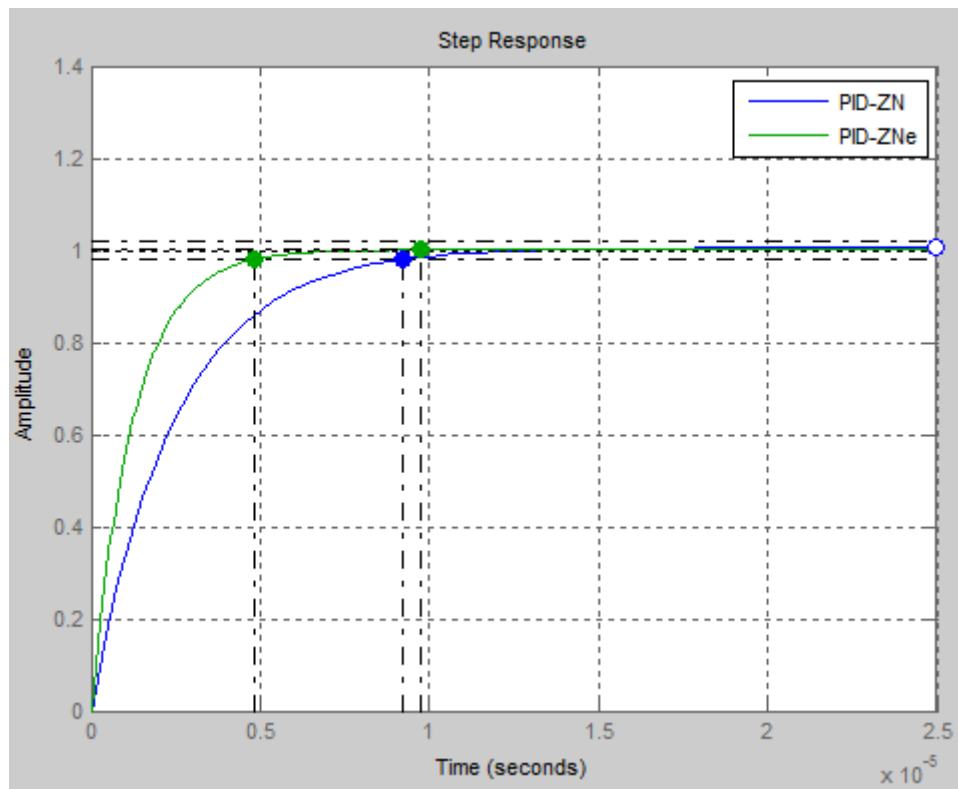


Figura 38. Respuesta PID con $K_{de}=2 \cdot K_d$.

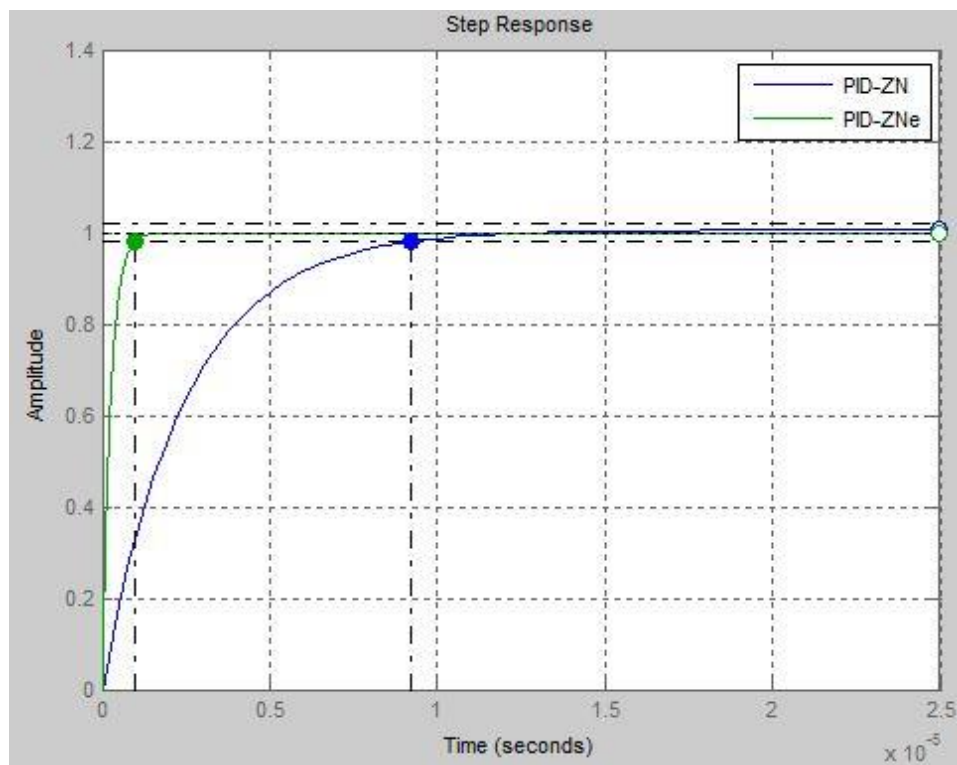


Figura 39. Respuesta PID con $K_{de}=10 \cdot K_d$.

Como podemos apreciar, según aumentamos la ganancia derivativa, el tiempo de establecimiento disminuye considerablemente, ya que aumentamos la velocidad de respuesta del sistema. Si fuese un sistema que oscilase, a la vez que aumentamos esta velocidad de

respuesta y disminuimos el tiempo de establecimiento, disminuiría la oscilación, aumentando el tiempo de pico, en el cual se alcanzase el máximo.

Si probamos con una K_d menor, en este caso $K_d = 0.5 * K_d$, como podemos ver en la **figura 40**, ocurre lo contrario, el tiempo de establecimiento aumenta, pues disminuye la velocidad de respuesta del sistema, haciendo que el tiempo de pico aumente también.

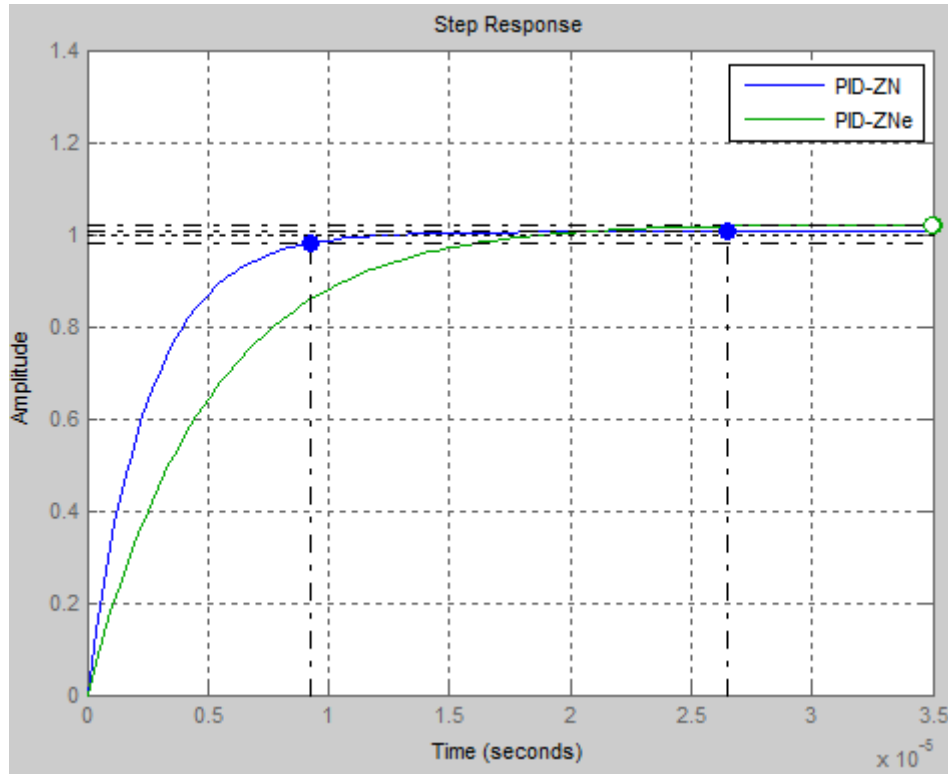


Figura 40. Respuesta PID con $K_d = 0.5 * K_d$.

Después de este análisis en el que hemos podido observar la relación que tiene cada una de las ganancias con el sistema, tenemos una idea más clara de donde atacar, para mejorar el PID dado por Ziegler-Nichols. Dado que la sintonización de los PID tradicionalmente se ha llevado a cabo a través del método de prueba y error, en donde la experiencia en esta sintonización era un factor a favor a tener en cuenta, el haber hecho este pequeño análisis, nos ayuda a la hora de probar para mejorar el PID.

```
%Controlador modificado
Kpe=1.2*Kp;
Kie=Ki;
Kde=1.5*Kd;
CE=tf([Kde Kpe Kie],[1 0]); %Controlador experimental PID
VALCE=feedback(CE*VA,1); %función en lazo cerrado
figure(4)
step(VALC,VALCE) %Obtenemos respuesta del sistema regulado con ambos PID
                  %ante señal escalón
legend('PID-ZN','PID-ZNe')
grid %Ponemos cuadrícula al gráfico
```

Figura 41. Primera aproximación a nuestro PID. $K_p = 1.2 * K_p$ y $K_d = 1.5 * K_d$.

Como hemos comentado, dado que K_{ie} no tiene gran efecto en el sistema vamos dejarla con el valor original. Donde vamos a centrarnos para atacar al sistema, es en la variación de K_{de} y K_{pe} . En la **figura 41** podemos ver cuál sería la primera aproximación que realizamos, introducida en el código del programa, y la respuesta que produce en la **figura 42**.

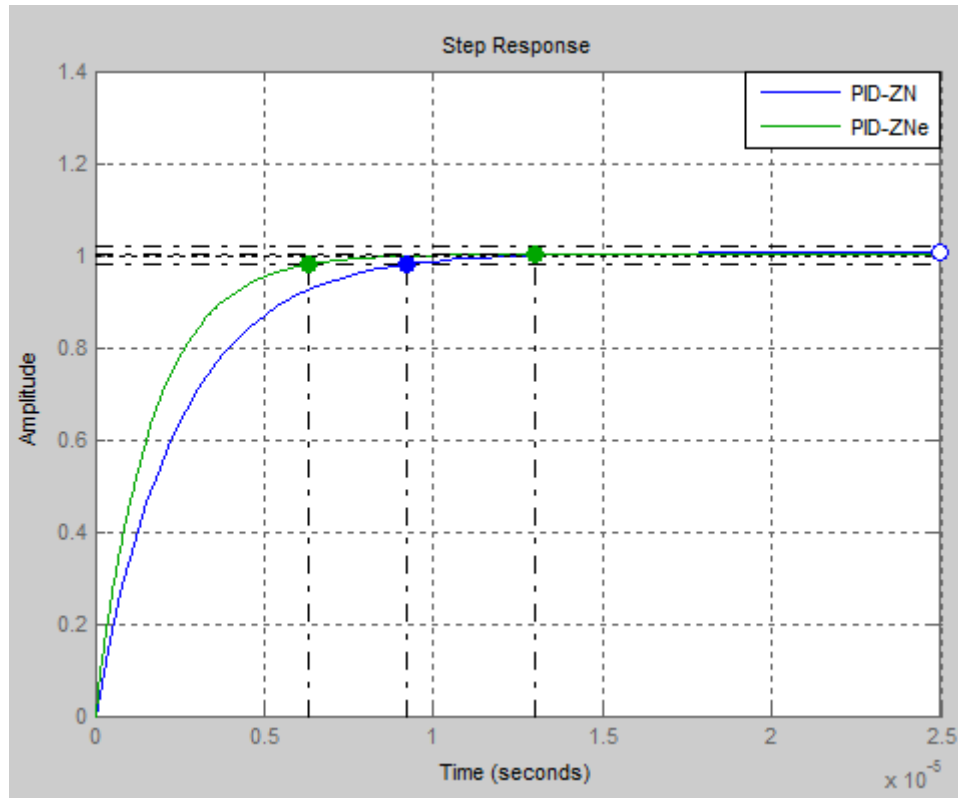


Figura 42. Respuesta del sistema a nuestro PID.

Como podemos ver, con este simple aumento de K_{de} y K_{pe} , mejoramos la velocidad del sistema, disminuyendo el tiempo de establecimiento y el tiempo de pico, que se reduce a casi la mitad, como podemos apreciar en el aumento de la **figura 43**, con lo que alcanzamos el valor de pico más rápidamente. Como podemos ver, no solo se disminuye el tiempo de pico, si no que reducimos también la sobre oscilación presente en el sistema aún más.

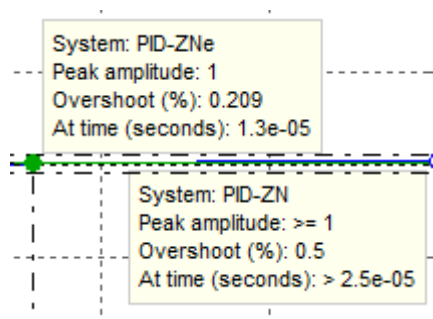


Figura 43. Detalle de los picos del sistema con el nuevo control PID.

Aunque el sistema ya es bastante preciso por sí solo, con el PID inicial calculado a través de Ziegler-Nichols, y con la primera aproximación realizada lo mejoramos de manera perceptible, vamos a intentar aumentar la velocidad de establecimiento, de modo que el

tiempo se disminuya cerca de un 50%. Para esto, modificamos el código de nuestro programa tal y como se ve en la **figura 44**.

```
%Controlador modificado
Kpe=2*Kp;
Kie=Ki;
Kde=2*Kd;
CE=tf([Kde Kpe Kie],[1 0]); %Controlador experimental PID
VALCE=feedback(CE*VA,1); %función en lazo cerrado
figure(4)
step(VALC,VALCE) %Obtenemos respuesta del sistema regulado con ambos PID
                 %ante señal escalón
legend('PID-ZN','PID-ZNe')
grid           %Ponemos cuadrícula al gráfico
```

Figura 44. Segunda aproximación a nuestro PID. $K_{pe}=2 \cdot K_p$ y $K_{de}=2 \cdot K_d$.

Del mismo modo que en la aproximación anterior, al aumentar nuestras ganancias aumentamos de nuevo la velocidad del sistema, haciendo que el tiempo de establecimiento se reduzca alrededor de un 50%, tal y como habíamos decidido. Paralelamente hemos hecho que el tiempo de pico se reduzca de nuevo, aumentando la velocidad general del sistema. Se produce un pequeño aumento en la sobre oscilación, pero no es apreciable. La respuesta de este sistema puede verse en la **figura 45**.

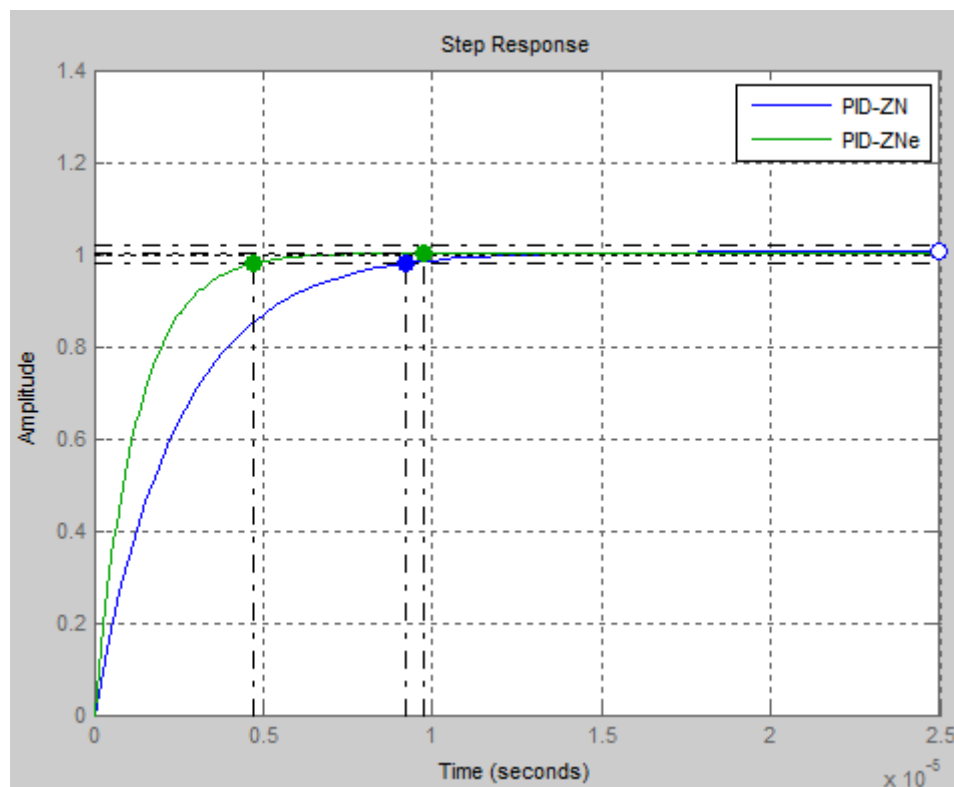


Figura 45. Respuesta del sistema a nuestro segundo PID

Vamos a establecer este PID como válido y definitivo en nuestro caso, ya que el tiempo de respuesta es lo suficientemente rápido para nuestro sistema, y no produce una sobre oscilación que pueda perturbar la producción.

La función del PID queda finalmente de la siguiente manera:

$$CE_{va}(s) = \frac{K_{de}s^2 + K_{pe}s + K_{ie}}{s} = \frac{0.0078s^2 + 22.3358s + 8022.7}{s}$$

$$K_{de} = 0.0078$$

$$K_{pe} = 22.3358$$

$$K_{ie} = 8022.7$$

Una vez calculado el PID para la válvula de agua, el cálculo del PID de la válvula de jarabe se realiza de igual manera. Se utilizará un código similar al utilizado para el cálculo del PID anterior, la salvedad es la función de transferencia con la que trabajamos. Con esta función de transferencia que hemos calculado en el capítulo anterior, lo primero que hacemos es comprobar la estabilidad del sistema. En la **figura 46** podemos ver el código utilizado.

```
kv=425;
fn=60;
wn=2*3.141593*fn;
chi=0.95;
VJ=tf(kv*wn^2,[1 2*chi*wn wn^2]);
pVJ=pole(VJ);           %Calculamos los polos del sistema
Kva=(kv*wn^2)/(wn^2);   %Ganancia del sistema
figure(1)
pzmap(VA)                %obtenemos los polos de H gráficamente para ver si
grid on                  %podemos trabajar con ella, si es estable.
dt=0.0005;               %Creamos una constante de tiempos
t=0:dt:0.03;             %Creamos la matriz de incrementos
y=step(VJ,t)';           %Función de respuesta al escalón
dy=diff(y)/dt;           %Derivada de la función
[m,p]=max(dy);           %Punto de inflexión de la función
yi=y(p);                 %Valor de y en el punto de inflexión calculado
ti=t(p);                 %Tiempo en que ocurre el punto de inflexión
L=ti-yi/m;               %Valor del retardo
T=(y(end)-yi)/m+ti-L;     %Constante de tiempo
figure(2)
plot(t,y,'b',[0 L L+T t(end)],[0 0 y(end) y(end)],'k')
title('Respuesta al escalón')
ylabel('Amplitud')
xlabel('tiempo(s)')
legend('Exacta','Aproximación lineal')
```

Figura 46. Código para calcular las variables principales de Ziegler-Nichols para la válvula de jarabe.

Para poder comprobar la estabilidad de manera visual, representamos los polos del sistema mediante el comando pzmap (**Figura 47**). Una vez comprobada la estabilidad, debemos asegurarnos que el sistema es compatible con el primer método de Ziegler-Nichols, de igual modo que hicimos en el caso de la válvula de agua. En la **figura 48** representamos la respuesta del sistema a una señal escalón, así como su aproximación lineal, que utilizaremos para el cálculo de las variables principales de Ziegler-Nichols.

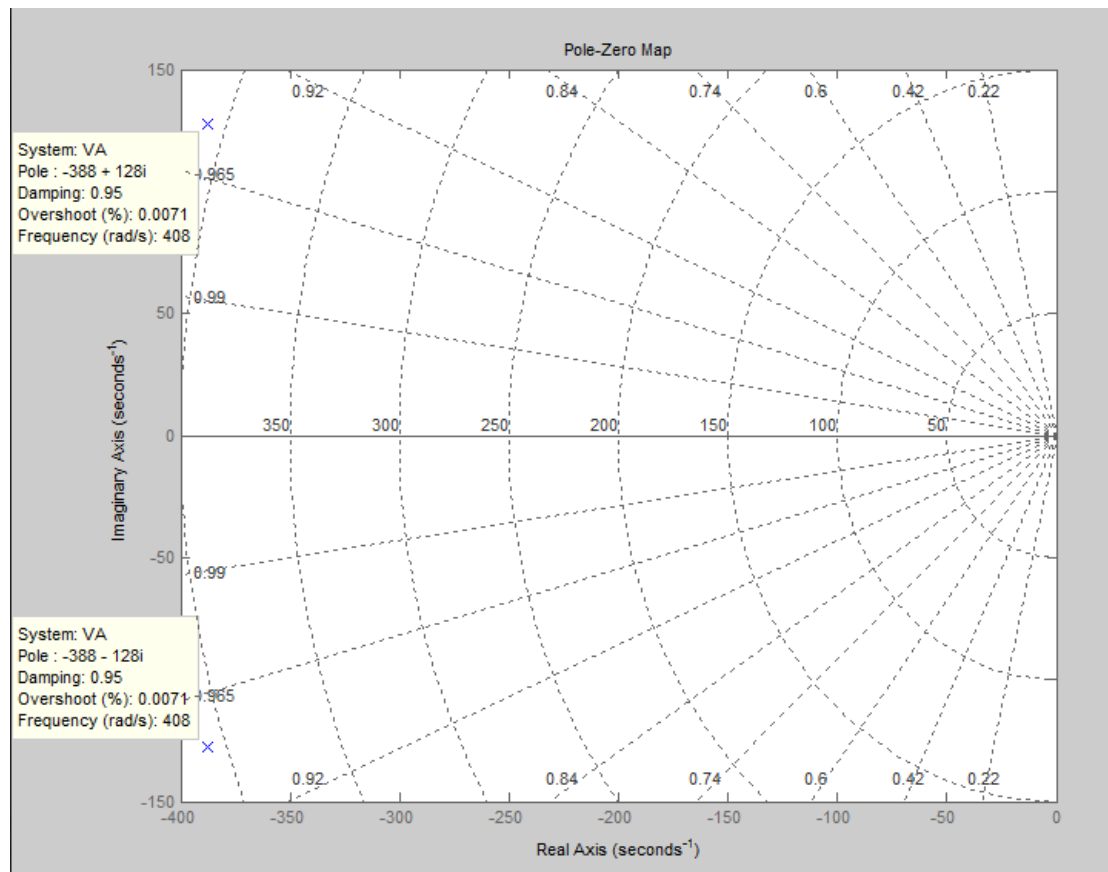


Figura 47. Polos de la válvula de jarabe.

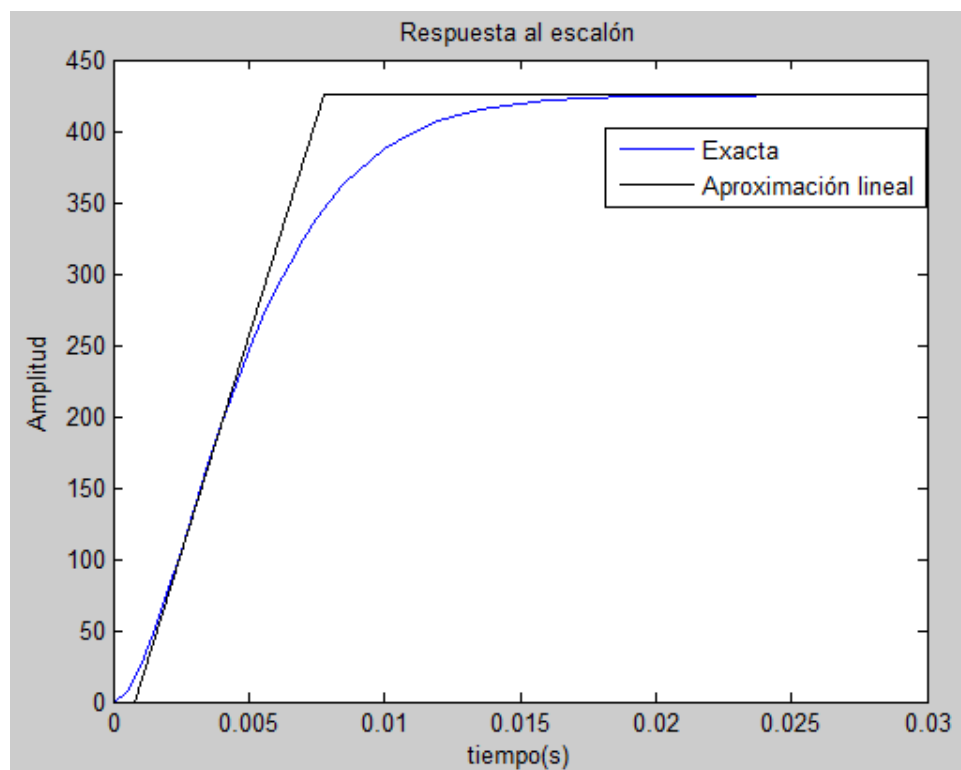


Figura 48. Respuesta a escalón de la válvula de jarabe.

De igual modo que pasaba con la válvula de agua, la forma se asemeja a una S por lo que podemos aplicar el criterio de Ziegler-Nichols, en concreto, el primer método. Si solicitamos los datos de retardo y constante de tiempo en Matlab, obtenemos lo siguiente:

$$L = 7.6408 \times 10^{-4} \text{ sec}$$

$$T = 0.0070 \text{ sec}$$

Utilizando las fórmulas que aparecen en la **figura 25**, creamos nuestra función de transferencia correspondiente al regulador teórico inicial de Ziegler-Nichols, con el mismo código que en la **figura 29**. Según este código, obtenemos los siguientes valores para las variables de Ziegler-Nichols.

$$K_p = 1.2 * \frac{T}{L} = 10.9656$$

$$T_i = 2 * L = 0.0015$$

$$T_d = 0.5 * L = 3.8204 \times 10^{-4}$$

De estos valores, obtenemos las ganancias del PID, para poder realizar una representación más sencilla:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = 7.1757 \times 10^3$$

$$K_d = K_p * T_d = 0.0042$$

Con estos valores, obtenemos la función de transferencia del controlador PID teórico dado por Ziegler-Nichols.

$$CE_{vj}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} = \frac{0.0042s^2 + 10.9656s + 7175.7}{s}$$

En la **figura 49** podemos ver cuál sería la respuesta del sistema con este regulador PID. Esta respuesta se calcula mediante el código que aparece reflejado en la **figura 31**. Mediante el controlador PID deducido a través de las reglas de Ziegler-Nichols, obtenemos un tiempo de establecimiento $t_s = 1.43 \times 10^{-5} \text{ sec}$ y el sobrepaso máximo es de $M_p = 1.1$.

Con esta información, y después de haber analizado anteriormente la relación de las diferentes ganancias con el sistema, en referencia a la válvula de agua, y dado que pertenecen a la misma familia, podemos empezar el desarrollo directo del PID, ya que esta relación se mantendrá.

Se utiliza el mismo código presentado en la **figura 32**, pero con distintos multiplicadores que pasaremos a definir a continuación.

Como ya se indicó con anterioridad, se procederá a modificar las ganancias K_d y K_p , ya que K_i no modifica la respuesta de este sistema.

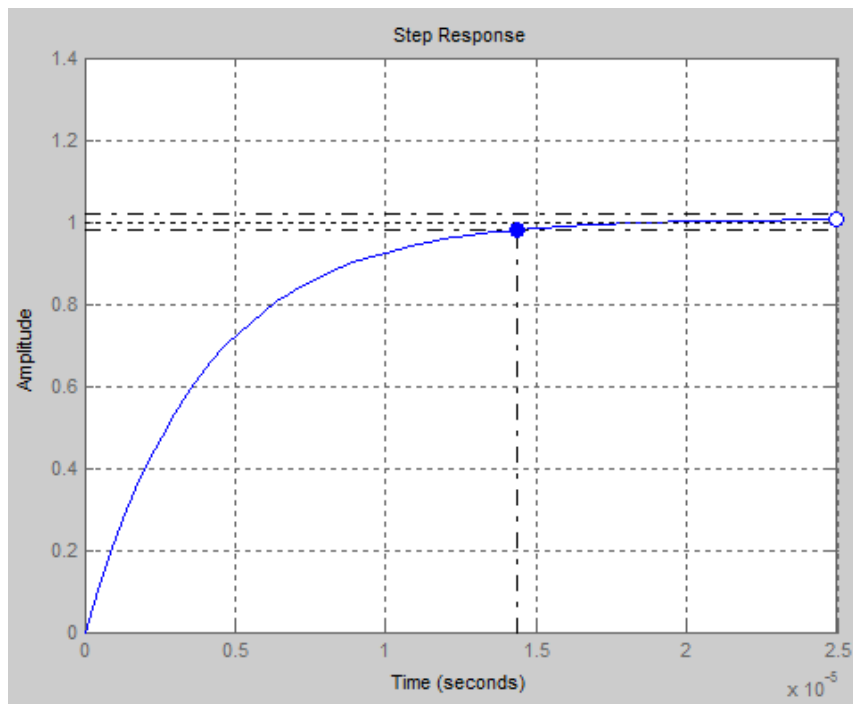


Figura 49. Respuesta del sistema en lazo cerrado con el PID inicial.

Como son válvulas de la misma familia, y sus características son similares, vamos a probar introduciendo directamente los mismos multiplicadores que los asociados al PID calculado para la válvula de agua. Según esto, introducimos $K_{de}=2 \cdot K_d$ y $K_{pe}=2 \cdot K_p$, con lo que obtenemos la respuesta de la **figura 50**.

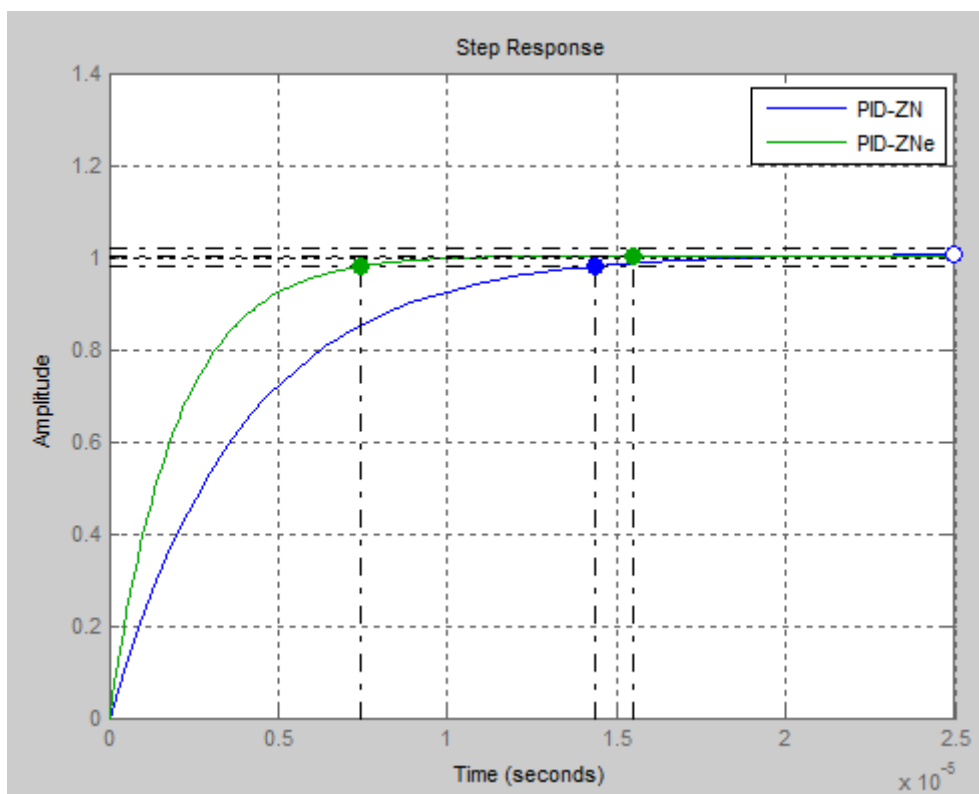


Figura 50. Respuesta del sistema para el primer PID modificado.

Como podemos ver, el tiempo de establecimiento se reduce casi a la mitad, aumentando la velocidad del sistema en este caso de manera considerable. El punto máximo y el tiempo de pico también se reducen, aunque no llegan al nivel del tiempo de establecimiento.

Dados estos buenos resultados, podríamos dar como válido este PID que acabamos de calcular, pero vamos a realizar una nueva modificación para reducir también el tiempo de pico, del mismo modo que hicimos en el caso de la válvula de agua.

Para hacer esta nueva modificación del PID, vamos a mantener el valor de $K_{pe}=2 \cdot K_p$, y vamos a aumentar K_{de} a $2.5 \cdot K_d$. Esto lo hacemos así, porque para reducir el tiempo de pico, necesitamos que el sistema sea más rápido, cosa que se consigue con este aumento de la ganancia derivativa. En la **figura 51** podemos ver cuál sería la respuesta de este sistema.

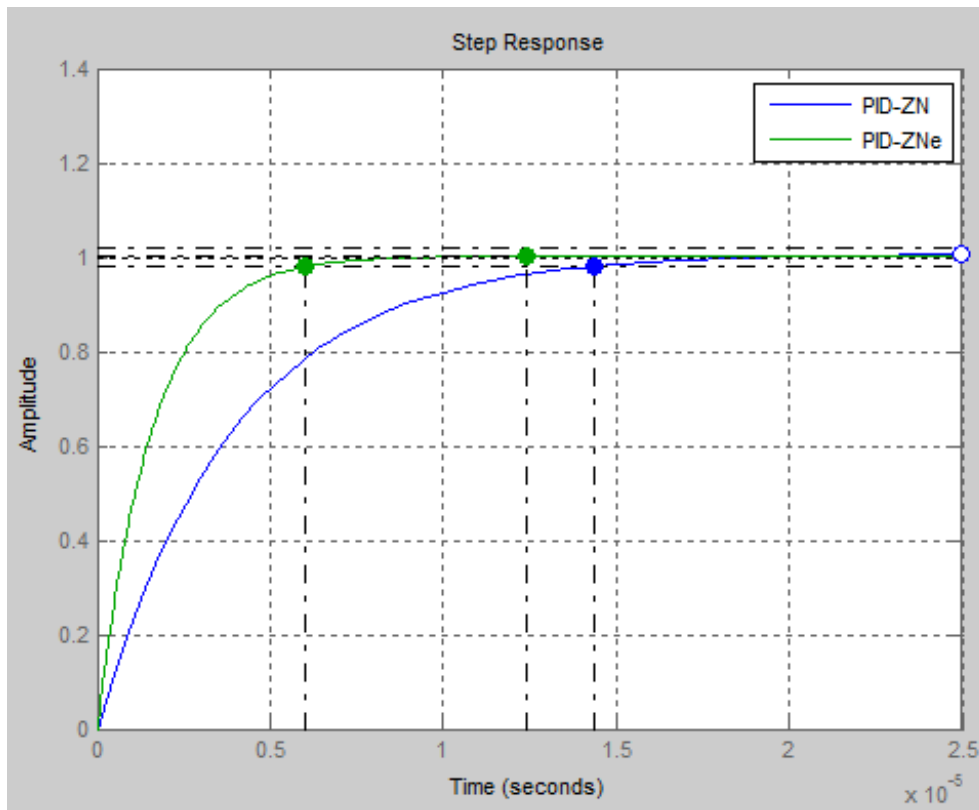


Figura 51. Respuesta del sistema de la válvula de jarabe a nuestro segundo PID.

Con esta nueva modificación hemos conseguido nuestro objetivo de reducir a la mitad el tiempo de pico del sistema, y además, hemos reducido el tiempo de establecimiento en comparación al primer PID. Vamos a tomar como válido este sistema PID, con lo que la función de transferencia quedaría así:

$$CE_{vj}(s) = \frac{K_{de}s^2 + K_{pe}s + K_{ie}}{s} = \frac{0.01047s^2 + 21.93s + 7176}{s}$$

$$K_{de} = 0.0105; K_{pe} = 21.9313; K_{ie} = 7175.7$$

Una vez presentados los dos reguladores PID, para las válvulas de agua y jarabe, y teniendo en cuenta que la válvula de carbónico se controla de forma proporcional en función del caudal de agua, se da por terminado el diseño del sistema de control.

5. Resultado y discusión

Se ha realizado satisfactoriamente el cálculo de los reguladores PID del sistema real simulado, a través de las reglas de sintonización de Ziegler-Nichols, consiguiendo los reguladores siguientes:

$$CE_{va}(s) = \frac{K_{de}s^2 + K_{pe}s + K_{ie}}{s} = \frac{0.0078s^2 + 22.3358s + 8022.7}{s}$$

$$CE_{vj}(s) = \frac{K_{de}s^2 + K_{pe}s + K_{ie}}{s} = \frac{0.01047s^2 + 21.93s + 7176}{s}$$

Dadas las características físicas del sistema, siendo este un sistema estable, pero con una ξ elevada, su comportamiento se ha asemejado a un sistema críticamente amortiguado. Esto ha hecho que el sistema no presente una sobre oscilación.

Tras las pruebas realizadas a los sistemas se ha verificado que la influencia en este sistema de la variable integral no es relevante, debido a que al no producirse sobre oscilaciones, la corrección del error que haría esta parte del controlador pierde importancia.

Dada la constante derivativa, hemos visto clara su relación con la velocidad del sistema, es decir, con el tiempo de establecimiento, reduciéndolo a la par que esta aumenta.

La constante proporcional también nos proporciona una mejoría en el tiempo de establecimiento, pero su mayor aporte está relacionado con el valor del punto máximo de la respuesta. Hemos comprobado que si la ganancia proporcional es demasiado elevada, el sistema vería aumentada su velocidad, pero en contraposición, el valor máximo excedería el valor máximo de seguridad establecido para el sistema, algo indeseado en el proceso.

Dado que es un proceso industrial, las válvulas tienen unos tiempos de respuesta elevados, lo que explicaría los valores tan extremos en las variables a controlar, ya que el rango de tiempo en el que nos estamos moviendo es de $2.5 \times 10^{-5} \text{sec}$, cuando hablamos de la respuesta de la señal de control.

Estos resultados habría que introducirlos dentro del controlador del mezclador, para regular la respuesta de las válvulas y el resto de equipos. Según el valor calculado por el controlador, este envía la información a las válvulas en forma de señal analógica, mediante un coil en el rango de $\pm 40 \text{mA}$.

6. Presupuesto

Dado que este proceso se enmarca dentro de un proceso industrial real, es necesario realizar una estimación o presupuesto de las actividades realizadas.

Para los gastos de personal se ha de aclarar que por diferentes motivos, no se ha realizado una dedicación total al desarrollo de este proyecto, al haberse compatibilizado su desarrollo con diversas tareas. Hay que añadir, que el proyecto se ha realizado durante dos periodos de tiempo separados.

- Durante la realización de las prácticas en empresa se dedicó la parte final de las mismas, el periodo comprendido entre octubre y diciembre de 2012.
- En periodo abarcado en el año 2014, se ha trabajado en el proyecto de manera continuada desde el mes de febrero hasta junio.

Unidad	Descripción	Cantidad	Coste unidad	Coste total
Ingeniero industrial electrónico	Ingeniero industrial para investigación y desarrollo del proyecto: DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE UNA MEZCLADORA DE FLUIDOS	7 meses	1200 Eur/mes	8400 Eur
TOTAL PARTIDA				8400 Eur

Figura 52. Coste de personal.

El coste de material asociado a este proyecto se puede ver en el cuadro de la **figura 53**. En él figuran el valor de las licencias y equipo utilizados. En la **figura 54** podemos ver el resumen total del presupuesto para este proyecto.

Unidad	Descripción	Cantidad	Coste unidad	Coste total
PC	Ordenador portátil con instalación de Windows 7 profesional	1	899 Eur	899 Eur
Microsoft Office Hogar y Estudiantes	Licencia para herramienta Office Hogar y Estudiantes	1	119 Eur	119 Eur
Matlab y Simulink	MATLAB and Simulink Student Suite	1	363 Eur	363 Eur
Llamada internacional	Llamada internacional a Alemania para contactar con soporte	120 min	21,78 cts./min	26,136 Eur
Total partida				1407,136 Eur

Figura 53. Coste de material.

Unidad	Cantidad	Coste total
Coste de personal	1	8400 Eur
Coste de material	1	1407,136 Eur
Total partida		9807,136 Eur

Figura 54. Coste total del proyecto.

7. Conclusiones

Una vez llegados a este punto del proyecto analizamos las acciones realizadas y la información detallada en el mismo, y podemos determinar que se han alcanzado los objetivos fijados al inicio.

- Se ha analizado el sistema real para adquisición de datos y comprensión de los procesos realizados por el mismo.
- Gracias a este estudio, se ha podido centrar la atención en el sistema a controlar y establecer las relaciones entre los diferentes elementos que lo componen.
- Una vez identificados los elementos del sistema, se ha desarrollado la ecuación teórica que nos permite simular el sistema real en el software, a través de la información suministrada por el fabricante.
- Utilizando las reglas de sintonización de Ziegler-Nichols hemos calculado los PID necesarios y hemos analizado la respuesta del sistema.

Tras la consecución de los objetivos fijados al inicio del proyecto, podemos evaluar en conjunto todo el desarrollo.

Gracias a la realización de este proyecto, se han podido desarrollar habilidades en el análisis, comprensión y manejo de sistemas reales. Se han obtenido conocimientos referentes al manejo de Matlab que no se tenían, y se han profundizado en los que se poseían.

Se ha obtenido una gran cantidad de conocimientos en cuanto a control de sistemas reales se refiere, la gran complejidad que entraña la simulación de estos sistemas cuando no se tiene la posibilidad de realizar pruebas en los mismos para encontrar sus características.

Pero sobre todo se ha dado respuesta a una de las motivaciones que han infundado el origen de este proyecto, el estudio y entendimiento de los reguladores PID hoy en día, para comprender su longevidad en el mundo de la automática industrial.

8. Bibliografía

- [1] **Real Academia Española.** (2001). *Diccionario de la lengua española*, 22ª edición. Madrid: Espasa.
- [2] **Ogata, Katsuhiko.** (1998). *Ingeniería de control moderna*, Tercera edición. [Trad.] Miguel Ángel Martínez Sarmiento. México: Prentice-Hall Hispanoamericana.
- [3] **The MathWorks, Inc.** (2012). *Matlab: The Language of Technical Computing* Consultada el 8 de febrero de 2014, en <http://www.mathworks.es/products/datasheets/pdf/matlab.pdf>
- [4] **Sidel SpA**, *The mix processor Starblend*. Consultada en noviembre de 2012, en http://www.linetec.pl/uploads/PDF/Proces/Starblend_GB_F_low.pdf
- [5] **Grupo GRUNDFOS.** *Documentación técnica bombas Hygiana*. Consultada en noviembre de 2012, en <http://net.grundfos.com/Appl/WebCAPS/InitCtrl?mode=1>
- [6] **Endress+Hauser.** *Proline Promag 53H Electromagnetic flowmeter*. Consultada en noviembre de 2012, en <http://www.es.endress.com/es/products/flow/debitmetre-electromagnetique-promag-53H?highlight=Promag%2053H>
- [7] **Emerson Process Management.** (2014). *Medidores Coriolis ELITE de caudal y densidad de máximas prestaciones*. Consultada en noviembre de 2012, en <http://www2.emersonprocess.com/es-ES/brands/micromotion/coriolis-flow-density-meters/ELITE/Pages/index.aspx>
- [8] **Moog Inc.** (2014). *Electrohydraulic Valves*. Consultada el 15 de febrero de 2014, en <http://www.moog.com/literature/ICD/Valves-Introduction.pdf>
- [9] **Moog Inc.** (2014). *Servo Valves 3-stage flow control, 79 series*. Consultada el 15 de febrero de 2014, en <http://www.moog.com/literature/ICD/Moog-Valves-79-Series-Catalog-en.pdf>
- [10] **Norgren GmbH.** (2013). *VP23, 3-way proportional pressure control valve*. Consultada en noviembre de 2012, en http://resources.norgren.com/document_resources/EN/N_en_6_6_050_VP23.pdf
- [11] **Moog Inc.** (1965). *Transfer functions for Moog servovalves*. Consultada el 15 de febrero de 2014, en http://www.servovalve.com/technical/new_tb_103.pdf